

Maa-6.280 GIS ja geodeettiset mittaukset

Martin Vermeer

13. huhtikuuta 2010

Kurssiesite

Laajuus 2 op

Opetusjakso I-II

Osaamistavoitteet Kurssin suorittamisen jälkeen opiskelija

- osaa käyttää geodeettiset työkalut, etenkin GPS differentiaalipaikannuksena tai tosi-aikaisena kinemaattisena paikannuksena, käytännön kartoitustyössä paikkatietokantoihin laitettavan aineiston keräämiseksi ja käsittelemiseksi.
- Osaa käyttää ja ymmärtää miten käytetään sekä differentiaali-GPS että RTK kartoitustyössä.
- On tietoinen GNSS-mittausten käytöstä geofysikaalisten mittausten yhteydessä.

Sisältö GNSS:n käyttö GIS:n yhteydessä: GNSS paikkatiedon tuotannossa, mittausmenetelmät, laitteistot ja sovellusesimerkit.

Referaattiharjoituksessa perehdytään ja esitetään parina yleisesti tuoreita GPS- ja GIS-aiheisia, populaarisia lehtijuttuja, tavoitteena oppia jotain alan tietotaidon nykytilasta ja samalla harjoitella tutkimus- esitys- ja yhteistyötaitoja.

Esitiedot Maa-6.279 tai Maa-6.2279 (pakollinen geomatiikan opiskelijoille, muille suositeltava).

Korvaavuudet Korvaa opintojakson Maa-6.280.

Kohderyhmä

Suoritustavat Kokonaissuoritus koostuu tentistä, ulkoharjoituksista ja referaattiharjoituksesta.

Työmäärä toteutustavoittain

- Luennot $10 \times 2 \text{ t} = 20 \text{ t}$
- Materiaalin itsenäinen opiskelu 22 t
- Ulkoharjoitukset $3 \times 2 \text{ t} = 6$
- Referaattiharjoitus 6 t
- Yhteensä 54 t

Arvostelu Tentin arvosana on kokonaissuorituksen arvosana, 1-5

Oppimateriaalit Luentomoniste

Opetuskieli Englanti jos tarpeen, muuten suomi

Kurssin henkilökunta ja yhteystiedot Martin Vermeer, huone M309, nimi@tkk.fi

Vastaanottoajat Sovitaan

CEFR-taso

Lisätietoja

Sisältö

1	GIS:n ja GPS:n perusteet	6
1.1	Paikkatiedot	6
1.1.1	Sijaintitieto	6
1.1.2	Ominaisuustieto	6
1.1.2.1	Yksilöivä ominaisuustieto	6
1.1.2.2	Paikantava ominaisuustieto	7
1.1.2.3	Ajoittava ominaisuustieto	7
1.1.2.4	Kuvaileva ominaisuustieto	7
1.2	Paikkatietojärjestelmät	7
1.2.1	Paikkatietokanta	7
1.2.2	Paikkatietostandardit	7
1.2.3	Suomen tilanne	8
1.3	Paikkatietojen laatu, koordinaattien laatu	8
1.4	Lyhenteet, käsitteet	9
1.5	GPS-järjestelmä ja GPS-mittaukset	10
1.5.1	GPS-järjestelmän osat	10
1.5.2	GPS-satelliitit ja signaalin rakenne	11
1.5.3	GPS-vastaanottimet	13
1.5.4	GPS-mittaukset kartoituksessa	13
2	Teknologiat	16
2.1	Vastaanotinteknologiat	16
2.1.1	Geodeettiset vastaanottimet v. huokeat vastaanottimet	16
2.1.2	Kantoaaltovaiheen mittaus	16
2.1.3	Proessori, firmware, ohjelmoitavuus	17
2.1.4	Softavastaanottimia	17
2.2	Paikkatietoteknologiat	17
2.2.1	Tiedonkeruu	17
2.2.2	Tiedonkeruulaitevaihtoehdot ja -sovellukset	18
2.2.3	Karttapohja ja paikkatietokanta	18
2.2.4	Eri käyttömodit	19
2.3	Tietoliikenneteknologiat	19
2.3.1	Vastaanottimen ja tiedonkeruulaitteen välillä	19
2.3.2	Liikkuvan vastaanottimen ja tukiaseman välillä	19
2.3.3	Internet-tiedon saanti	20
2.3.4	Mobiiliverkot	20
2.4	Standardit	20
2.4.1	RTCM SC-104 standardi	20
3	Kantoaaltovaihemittaukset ja paikkatietosovellukset	23
3.1	Yleistä	23
3.2	GPS-vaihemittausten virhelähteet	23
3.2.1	Satelliittien ratavirhe	24
3.2.2	Satelliittien kellovirhe	24
3.2.3	Ionosfääri	24
3.2.4	Troposfääri	24
3.2.5	Monitie	24
3.2.6	Laitteen kohinataso	25
3.3	Havaintojen kuvaus ja käsittely	25
3.3.1	Vaihemittaus	25

Sisältö

3.3.2	RTCM-protokolla ja kantoaaltovaiheet	26
3.3.3	NTRIP-protokolla	26
3.3.4	Ambiguiteettien ratkaiseminen	26
3.3.5	Eri ambiguiteetiratkaisumenetelmät	27
3.3.6	Vaihetuettu koodimittaus	27
3.4	Mittausmenetelmät ja -geometriat	28
3.4.1	Yksi tukiasema	28
3.4.2	Kolmen tukiaseman tapaus	30
3.4.3	Yhteenveto	32
3.4.4	Ilmakehän mallinnus	32
3.4.5	Tekninen toteutus	33
3.4.5.1	“Virtuaalitukiasema”	33
3.4.5.2	Verkkolaskenta palvelimella	33
3.4.5.3	Verkkolaskenta klientilla	34
3.5	Käytännön toteutukset	34
3.5.1	Geotrimin VRS-RTK ratkaisu	34
3.5.2	GL:n kokeet	34
3.5.3	Muut käyttökokemukset	34
3.5.4	Lisäksi...	34
4	Koodihavainnot ja paikkatietosovellukset	36
4.1	Yleistä	36
4.1.1	Paikkatiedon keruu	36
4.1.2	Paikkatiedon ylläpito	36
4.1.3	Mobiilit paikkatietojärjestelmät	36
4.1.4	Paikannetut palvelut	36
4.1.5	RTCM-standardi	37
4.1.6	Tarkkuus	37
4.1.7	Satelliittien ratavirhe	37
4.1.8	Satelliittien kellovirhe	38
4.1.9	Ionosfääri, troposfääri	38
4.1.10	Monitie	38
4.1.11	Laitteen kohinataso	38
4.1.12	SBAS-järjestelmät	38
4.1.13	Omnistar	38
4.1.14	Merenkulkulaitoksen palvelu	38
4.1.15	Fokus-palvelu	38
4.2	Mittausmenetelmät ja geometriat	39
4.3	Käytännön toteutukset	39
4.3.1	GIS-sovellukset	39
5	Uutta teknologiaa: GNSS-järjestelmät	40
5.1	GPS-modernisointi	40
5.1.1	Satelliittityypit	40
5.1.2	Uudet koodit	40
5.1.3	Uudet taajuudet	40
5.2	GLONASS	40
5.2.1	Toimijat	40
5.2.2	Systeemin kuvaus	41
5.3	Galileo	41
5.3.1	Toimijat	41
5.3.2	Satelliitit ja radat	42
5.3.3	Systeemin kuvaus, komponentit	42
5.3.4	Eri palvelut	42
5.4	Kiinalainen Beidou -järjestelmä	42
5.4.1	Beidou 1	43
5.4.2	Beidou 2	43
6	Uutta teknologiaa: SBAS-järjestelmät	44

Sisältö

6.1	Integriteetti ja Safety-of-Life	44
6.2	WAAS	44
6.2.1	LAAS	45
6.3	MSAS	46
6.4	EGNOS	46
6.4.1	EGNOSin maasegmentti	46
6.5	QZSS	46
6.6	SiSNET-kokeilu	48
7	Uutta teknologia: asennonmittaus	49
7.1	Inertialaite	49
7.2	GNSS:n moniantennijärjestelmä	49
7.3	MEMS (Microelectronic Mechanical System)	51
7.3.1	Kiihtyvyydsmittarit	51
7.3.2	Rotaatioanturit	51
7.4	Integraatio	51
8	GNSS, GIS and geophysics	53

1 GIS:n ja GPS:n perusteet

1.1 Paikkatiedot

[6] määrittelee *paikkatiedot* seuraavaksi:

“Tietokonemuotoista kartta- ja rekisteritietoja, jotka kuvaavat mm:

- luonnonvaroja
- maan pinnan muotoja
- maan käyttöä
- asutusta
- elinkeinotoimintaa
- liikenneverkkoja
- ympäristön tilaa.”

Lisäisin tähän

- Maan omistussuhteet ja muut objektiiviset oikeudet (katasteri)
- Maan suunniteltu käyttötarkoitus (kaavoitus)
- Paikkojen ja kohteiden nimet eri kielillä, myös perinteiset
- Paikkaan sidotut historialliset seikat

Paikkatieto koostuu *sijaintitiedosta* ja *ominaisuustiedosta*.

1.1.1 Sijaintitieto

Sijaintitieto voi olla *koordinaatit*, *geometriatieto* ja *topologiatieto*.

Pistemäisen kohteen sijainti kuvaa kaksi tai kolme paikkakoordinaattia, esim. Suomessa *kkj x,y* ja *N60 H*. Viiva- tai aluemaisen kohteen kuvaamiseksi tarvitaan useita sen pisteitä kuvaavia koordinaattisettejä. Usein annetaan “edustavan pisteen¹” eli centroidin koordinaatit ja kuvataan kohteen muoto ja koko muulla tavoin.

1.1.2 Ominaisuustieto

... eli teknisesti *attribuuttitieto*.

Attribuutit voivat olla *yksilöiviä*, *paikantavia*, *ajoittuvia* ja *kuvailevia*. Ominaisuustieto on tietyn kohteen näiden tietojen kokonaisuus. Esim.

- tietyn rakennuksen tunnus, postiosoite, rakennusvuosi ja käyttötarkoitus
- tietyn tieosuuden tienumero, kuntatunnus, päällystysvuosi ja -laji sekä kunto

1.1.2.1 Yksilöivä ominaisuustieto

Kohteen yksiselitteisesti yksilöivä eli identifioiva tieto: tyyppillisesti tunniste, mm. rakennuksen rakennustunnus, tontin katasterinumero, tien tienumero, järven nimi (+ tarvittaessa paikkakunnan nimi – on olemassa *monta* pyhäjärviä), jne.

¹... kuten rakennuksen etuovi

1.1.2.2 Paikantava ominaisuustieto

Mm. katuosoite, siis kohteen osoitejärjestelmän liittyvä tieto; tai toiseen, koordinaateilla paikannettuun kohteeseen liittyvä tietoa.

Myös koordinaatit voidaan pitää paikantavana ominaisuustietona, vaikka se ei ole tapana; joskus *korkeudet* rekisteröidään attribuuttina paikkatietokannassa, jossa on vain kahden paikkakoordinaatin mahdollisuus.

1.1.2.3 Ajoittava ominaisuustieto

Kohteen, tai kohteeseen liityvään tapahtuman tai havainnon aika-akselille sijoittava tieto.

Esim. rakennuksen rakennus- tai perusremonttivuosi; tien rakentamis- tai päällystys- tai perusparannusvuosi; järven jäänlähdon päivämäärä; uimaveden puhtaus läpi kesää; jne.

1.1.2.4 Kuvaileva ominaisuustieto

Tämä voi olla kohteen kaikkia muita ominaisuuksia kuvaileva tieto. Mm. rakennuksen käyttötarkoitus; tien päällystelaji; talon rakennusluvassa ilmoitetut julkisivun värit; kaivon radonipitoisuus; jne. jne. jne.

1.2 Paikkatietojärjestelmät

Paikkatietojärjestelmä on [6] mukaan:

- Tietojärjestelmä, jossa käsitellään paikkatietoja
- Tietojärjestelmä, joka tukee
 1. tiedon keruuta
 2. tiedon hallintaa ja ylläpitoa
 3. tietojen käsittelyä ja analyysiä
 4. tiedon tulostusta eri muodoissa mm. graafisesti ja tekstuaalisesti, sekä digitaalisesti että analogisesti

1.2.1 Paikkatietokanta

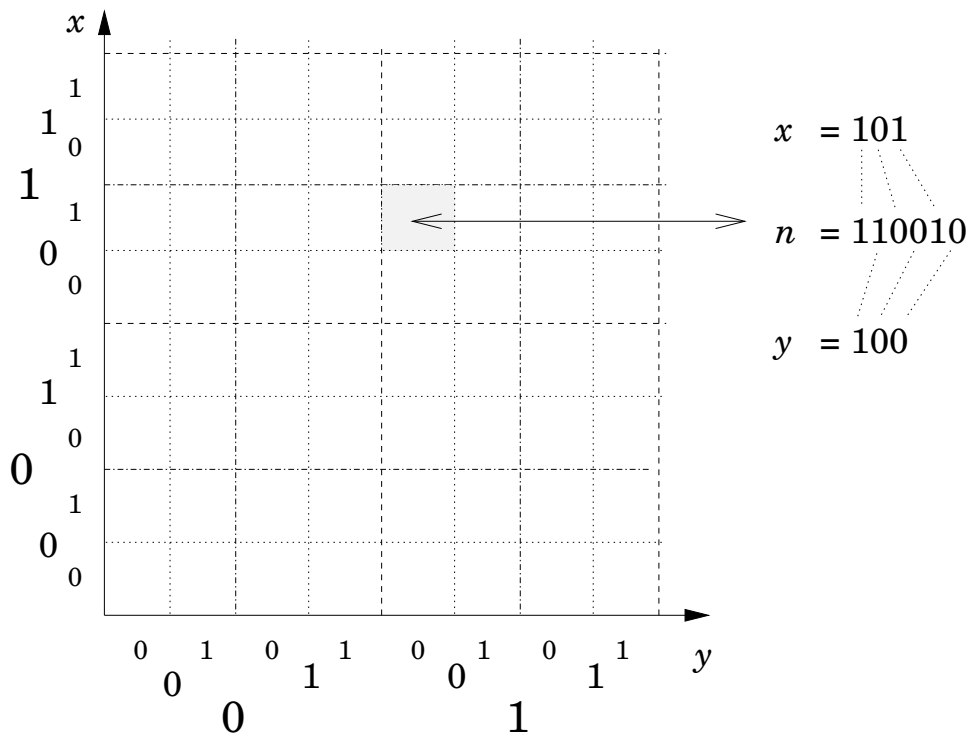
Ilmeisesti jokaisen paikkatietojärjestelmän keskeinen osa on *tietokanta*. Tämä voi olla yksinkertainen tiedosto, jopa tekstitiedosto, jos tietojen määrä on pieni. Muussa tapauksessa käytetään "oikea" tietokanta, ts. SQL-pohjainen relaatiotietokanta.

Voidaan mainita Oraclen kehittämä "spatiaalinen SQL": "Oracle Spatial", tietokannan lisäpalikka, joka mahdollistaa paikkatietojen tehokasta käsittelyä. Ks. <http://www.orafaq.com/faqsdo.htm>.

1.2.2 Paikkatietostandardit

The Open GIS Consortium (<http://www.opengis.org/>) on ollut aktiivinen kehittämään paikkatietoalan standardeja.

Mm. GML, "geography mark-up language" (GML standard <http://opengis.net/gml/>), joka on tällä hetkellä luonnosvaiheessa. Nimellä ISO/TC 211/PT 19136 se on ISO:n (International Standards Organizationin) ehdokasstandardi. GML on XML:n (Extensible Mark-up Language:n) variantti paikkatietoja varten.



Kuva 1.1: Yksi tapa spatiaali-objektin konstruomiseksi. n on numero, joka koostuu koordinaattien x, y biteista. Jos kaksi objektia n_1, n_2 ovat numeerisesti lähekkäin, silloin ne ovat myös x, y -tasossa lähekkäin ja päinvastoin. Numerot n käytetään spatiaaliobjektien indeksointiin tietokannassa

1.2.3 Suomen tilanne

Suomessa paikkatietojärjestelmiä käytetään hyvin monessa organisaatiossa sekä yritysmaailmassa ja valtion hallinnossa. Paikkatietojärjestelmät voivat mm. olla

- Hallinnollisia rekistereitä (JAKO, UKTJ)
- Suunnittelujärjestelmiä
- Ohjaus- ja optimointijärjestelmiä

Esimerkkeinä mainittakoon

- Maanmittauslaitoksen JAKO-kiinteistörekisteri
- UKTJ
- Metsän hoidon, hakkuun, kuljetusten suunnitelun ja seurannan järjestelmä
- Rakentamisen suunnittelu- ja seurantajärjestelmä (usein CAD)

1.3 Paikkatietojen laatu, koordinaattien laatu

Paikkatietojen laatu on laaja ongelmakenttä. Se jakautuu sijaintitiedon ja ominaisuustiedon laaduksi.

Emme tässä käsittele ominaisuustietojen laatua. Kun sijaintitieto saadaan geodeettisista mittauksista, meidän on käsiteltävä geodeettisen mittausprosessin tarkkuutta, mutta myös geodeettisen laskennan tarkkuutta.

Yksi asia joka on keskeisen tärkeä sijainnin tarkkuutta tutkiessa, on kysymys paikkatietojen datumista eli käytetystä vertausjärjestelmästä.

ISO-standardi 19111 "Spatial Referencing by Coordinates" määrittelee:

- **Co-ordinate system (CS):** tapa kuvata pisteiden sijainti koordinaattien avulla (abstraktisti). Suom. *koordinaatisto*

- **Co-ordinate reference system (CRS):** tapa sitoa koordinaatit Maapalloon. Suom. *koordinaattijärjestelmä*. Sen määrittelyyn vaaditaan *koordinaatisto* ja *datum*.

Kansainvälisissä geodeettisissa piireissä, etenkin IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service) käytetään myös seuraavat määrittelyt:

- *Co-ordinate system:* tapa kuvata pisteiden sijainti (abstraktisti). Esim. ITRS96, International Terrestrial Reference System 1996.
- *Co-ordinate frame:* tässä koordinaatit on sidottu Maapalloon geodeettisten mittausten avulla. Tätä prosessia kutsutaan CS:n *realisoinniksi*. Yhdellä CS:llä voi olla useita eri realisointeja.

Voidaan sanoa, että ETRS:n termi *Coordinate System* vastaa ISO-käsitteeseen **Coordinate System** ja ETRS:n *coordinate frame* käsitteeseen **Coordinate Reference System**.

Joka tapauksessa, tosielämässä löytyneet koordinaatit ovat aina jonkin datumin suhteen, je se datum on syytä ilmoittaa oikein.

Eri datumien (CRS, "frame") välillä voidaan suorittaa *koordinaattimuunnos*. Muunnoksen parametrit voidaan määrittää kokeellisesti, käyttämällä pistejoukko, joiden koordinaatit tunnetaan molemmissa järjestelmissä. Usein käytetty muunnos on (7-parametrinen) Helmert-muunnos. On varottava käyttämästä muunnos alueella, johon se ei sovellu, esim. alue, jonka lähistöllä ei ole muunnoksen määrittelyyn käytettyjä pisteitä.

OGC (Open Geospatial Consortium) on määrittänyt standardi "*Coordinate Transformation Service Implementation Specification*" (<http://www.opengeospatial.org/standards/ct>) koordinaattimuunnosten suorittamiseen tavalla, joka mahdollistaa eri valmistajien tuotteiden keskenään toimimista oikein (interoperability). OGC myös määrittelee *nimejä* monille käytössä oleville geodeettisille datumeille, ns. WKT (Well Known Text). Kuitenkin myös toiset nimitysjärjestelmät ovat käytössä, esim. EPSG:n (European Petroleum Survey Group) käyttämät numerot.

Osoitteelta <http://www.ncgia.ucsb.edu/globalgrids-book/specht/> löytyy kuvaus tästä standardista ja sen käyttömahdollisuuksista. Yksi mahdollinen käyttö on koordinaattien *muunnospalvelimen* pystyttäminen; tätä varten löytyy *Open GIS Web Map Server Interface Specification*. Kirjoittamisen hetkellä sellainen kokeellinen palvelin on toiminnassa Geodeettisella laitoksella: <http://coordtrans.fgi.fi/>.

Harjoitus: Avaa Google Earth ja etsi käsiisi Wienin kaupungin katunäkymä. Kytke päälle katuverkon näyttämisen.

Paljonko heittoa on taustakuvan (ilmakuvien) katuverkon ja päälle laitettun katuverkon välillä?

Harjoitus: toista eri kaupungeille: valitse sellainen kaupunki jonka nimi alkaa Sinun etunimen etukirjaimella.

1.4 Lyhenteet, käsitteet

XML Extensible Mark-up Language. Tämä merkintäkieli eroaa HTML:stä sillä tavalla, että se on *laajennettavissa* kuvaamaan monien alojen dokumenttien syntaktista rakennetta niiden *sisällön* eikä niiden graafisen ulkomuodon kuvaamiseksi. Ks. <http://herkules.oulu.fi/isbn951425242X/html/x1033.html>. XML:ää kaavailaan Internet-palvelujen ja -tiedonsiirron tehokkaaksi apuvälineeksi.

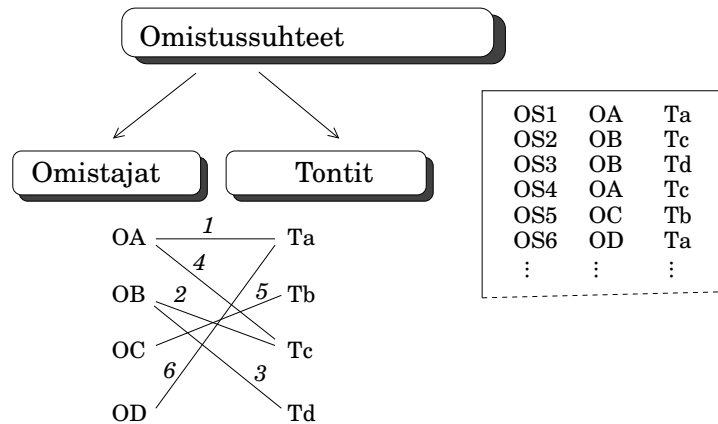
GML Geography mark-up language. XML-variantti paikkatietoalaa varten.

SQL "Structured Query Language": IBM:n kehittämä relaatiotietokantojen kyselykieli.

Relaatiotietokanta Tietokanta, jossa tieto tallennetaan "relaatioiden" eli taulukoiden muodossa: jokaisella taulukolla on *nimi*, taulukon rivit kuvaavat samantyyppiset mutta ei-identtiset elementit, joiden attribuutit kuvaavat taulukon sarakkeet.

Esimerkiksi haluamme kuvata kunta-alue, jossa on omistajat ja tontit. Jos muodostettaisiin kaksi taulukkoa "Tontit" ja "Omistajat", ne eivät olisi kauniisti suorakulmaisia, koska yksi ihminen voi omistaa vaihteleva määrä tontteja, ja vastaavasti tontin voi omistaa vaihteleva määrä omistajia. Myös tietokannan päivitys olisi monimutkainen: on päivitettävä kaksi ei-suorakulmaista taulukkoa. Tietueen suorasaanti ei silloin onnistu.

Relaatiotietokannassa tilannetta kuvattaisiin seuraavalla tavalla:



Kuva 1.2: Relaatietietokannan esimerkki

1. Luodaan taulukko "Omistussuhteet", joka sisältää kaksi attribuuttikenttää: "Omistajat" ja "Tontit". Jokainen omistussuhde eli (omistaja, tontti) -pari voi esiintyä vain kerran.
2. Tämän lisäksi voi tietenkin myös olla (ja aina on) olemassa taulukot "Omistajat" ja "Tontit" joissa omistajien tai tonttien muut mielenkiintoiset ominaisuudet on tallennettuja attribuutteina.

Kyselyt tehdään SQL:n avulla. Esimerkiksi "Tulosta kaikki tontit, joilla on enemmän kuin 3 omistajaa". On käytävä koko Omistussuhteet-tila läpi ja laskea, jokaiselle omistajalle, montako tonttia omistaa eli monessako "Omistussuhteet"-tietueessa esiintyy.

Kuitenkin nämä alkeisoperaatiot voidaan implementoida hyvin nopeiksi kun taulukot on suorakulmaisia. Myös taulukoiden laajeneminen lisäsarakeilla on helppoa, ja samasta aineistosta voidaan helposti tuottaa käyttäjälle eri "näköyksiä" (*views*).

Object-relational Relaatietietokanta, johon voidaan tallentaa myös kuvia, taulukoita, multimedia-objekteja jne. Koska ne ovat vaihtelevan kokoisia, ne tallennetaan kovalevylle ja "ydintietokannan" muistissa on vain niiden osoitetiedot.

JAKO on Maanmittauslaitoksen käyttämä, SmallWorld-pohjainen hajautettu kiinteistörekisterisovellus. 30 gigatavun tietokanta sisältää kaikki Suomen kiinteistötiedot, 10 miljoonaa kiinteistörajaa ja 6 miljoonaa rajamerkkiä.

UKTJ Uusi Kuntien Tietojärjestelmä, Suomen kuntien uusi paikkatietojärjestelmänhanke yhteistyössä Maanmittauslaitoksen kanssa.

CAD Computer Aided Design. Mikäli käytetään rakennusten suunnitteluun tai kartoitukseen, voidaan myös puhua paikkatietojärjestelmästä. AutoCAD, Bentley MicroStation.

1.5 GPS-järjestelmä ja GPS-mittaukset

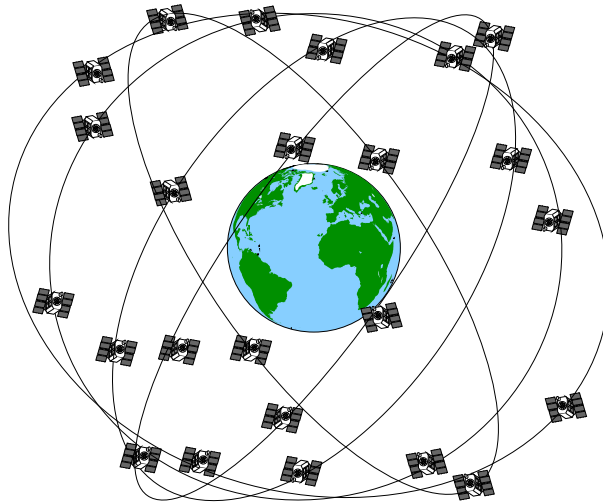
1.5.1 GPS-järjestelmän osat

GPS järjestelmä koostuu kolmesta segmentistä (lohkosta): Avaruus- valvonta- ja käyttäjäsegmentti. Avaruussegmenttiin kuuluu vähintään 24, käytännössä 26-29 satelliittia, mukaan lukien "active spares". Neljä ratatasoa, jokaisessa kuusi satelliittia. Geometria satelliitti-identiteetteineen toistuu 23t 56m (yhden tähtivuorokauden, kahden GPS-satelliittien periodin) jälkeen. Ratatasojen kaltevuus on 55°.

Satelliitit ovat tyypiltään Block I (alkuperäiset) ja Block II (ensimmäinen laukaistiin 1989). Uusin tyyppi on Block IIR.

Geometrian ansiosta nähdään melkein missä maan päällä tahansa melkein koska tahansa ainakin 4 satelliittia horisontin yläpuolella, useimmiten enemmän.

Lisätietoja: [9].



Kuva 1.3: GPS-konstellaatio

Taulukko 1.1: GPS-signaalin kantoaalto

Kantoaalto	Taajuus (MHz)	Aallonpituus (cm)	Perustaajuuden (10.23 MHz:n) monikko
L1	1575.42	19.0	154×
L2	1227.60	24.4	120×

Valvontasegmentti koostuu kuudesta havaintoasemasta ja neljästä antenniasemasta, joiden kautta uudet rataelementit jne. lähetetään ylös satelliittien muistiin, normaalista kahdesti vuorokaudessa. Laskentakeskus (MCS, Master Control Station) on Schriever Air Force Base, Colorado.

1.5.2 GPS-satelliitit ja signaalin rakenne

GPS-satelliitin lähettämä radiosignaali koostuu *kantoaallosta* ja sen päällä moduloidulla ns. *pseudosatunnaiskoodeja*. Molemmat voidaan käyttää paikannukseen.

Kantoaalto: aallonpituus n. 20 cm, paikannustarkkuus 1% siitä eli n. 2 mm. Geodeettinen GPS-paikanmääritys perustuu kantaallon vaiheen mittaukseen. Tähän käytetään aina kaksitaajuusvastaanottimia. Ks. taulukko 1.1.

Ongelmana: kaikki aallot ovat samannäköisiä, eli tarvitaan *ambiguiteettiresoluutio*. Tähän on kehitetty monta ratkaisua.

Koodi: "pseudo-aallonpituus" on 30 m (P-koodi, ns. "chip rate" eli bittien välinen etäisyys): paikannustarkkuus 1% siitä eli n. 30 cm. Koodit on moduloituna käyttäen ns. *vaihemodulaatiota*, ks. kuva.

Tarkemmin: C/A-koodin chip rate eli bittinopeus vastaa "aallonpituuteen" 300 m, P-koodin vastaava luku antaa 30 m. Ks. taulukko 1.2.

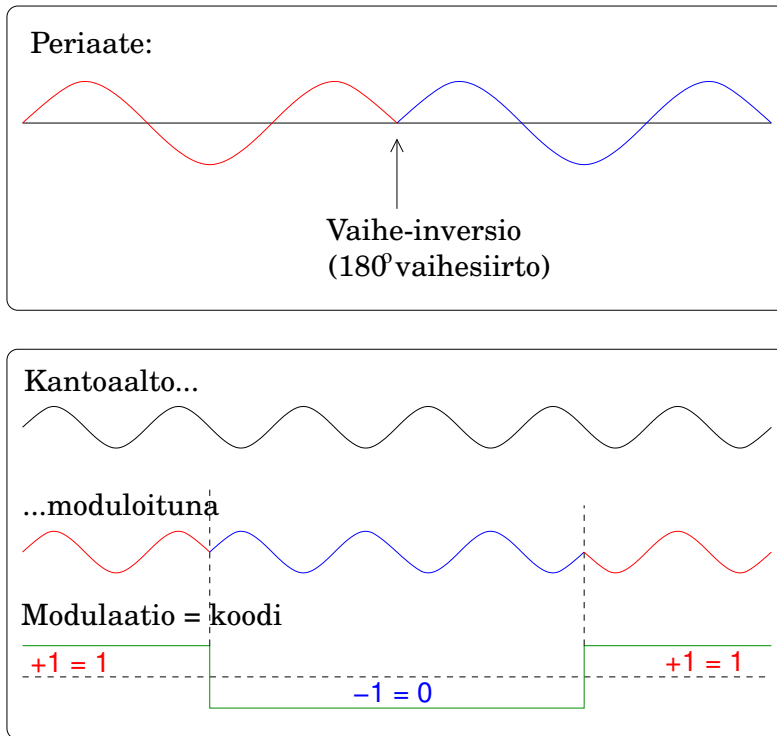
Käytännössä molempien menetelmien ongelmana on satelliittiratojen epätarkkuus. Reaaliajassa, käyttämällä *broadcast ephemeris*, saadaan parhaimmillaan ± 10 m paikannustarkkuutta aikaan.

Ratkaisu: differentiaalipaikannus eli tukiaseman käyttö. Jos etäisyys tukiasemalta on riittävän pieni, suurin osa ratavirheestä kumoutuu lopputuloksesta, ks. kuva 1.5

Differentiaalipaikannuksen tarkkuus voidaan arvioida helposti geometrisen tarkastelun avulla. Ks. kuva 1.6. Jos satelliitiradan (*broadcast ephemeris*:n) geometrinen tarkkuus kutsutaan Δ ja satelliitin etäisyys havaintopisteeltä s (käytännössä yli 20 000 km), seuraa paikannustarkkuudeksi

$$\delta \approx \frac{d}{s} \Delta,$$

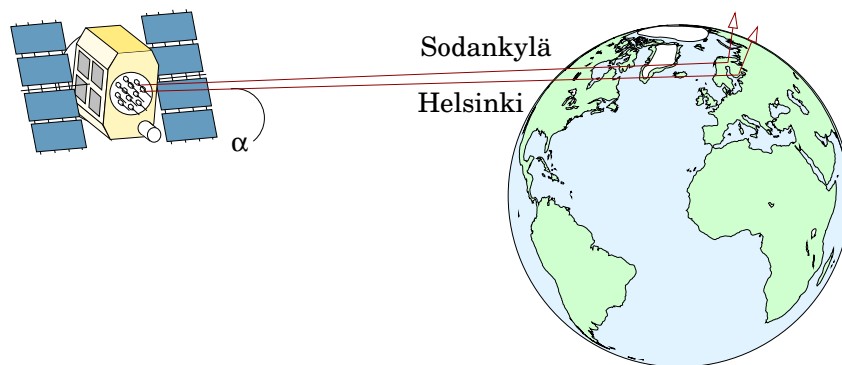
jossa d on mitattavan vektorin pituus. Tämän kaavan avulla muodostetaan taulukko 1.3.



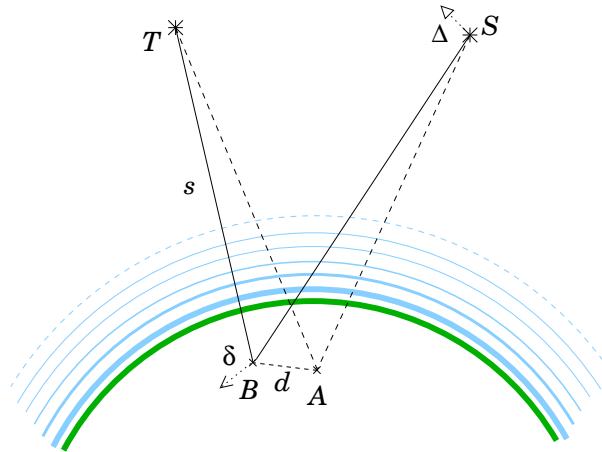
Kuva 1.4: Vaihemodulaation periaate

Taulukko 1.2: GPS-signaalin eri koodit (pseudo-satunnaiskoodit, PRC)

Lyhennys	Nimi	Modulaatio- taajuus	Toisto-jakso	Kanto-aalto
C/A	Coarse/Acquisition	1.023 Mb/s	1 ms	L1
P	Precise / Protected	10.23 Mb/s	1 viikko	L1,L2
Y	P:n ja salaisen W-koodin yhdistelmä	10.23 Mb/s		L1,L2
	Navigation message	50 bittiä/s	jatkuva	L1,L2



Kuva 1.5: Differentiaalipaikannus. Kahden maa-aseman, tässä Helsingin ja Sodankylän, välinen etäisyys on aina *pieni* verrattuna satelliitin ratakorkeus, 20 000 km. Siksi ratavirhe (kuten satelliitin kellovirhe) kumoutuu suurilta osin differentiaalimittauksista.



Kuva 1.6: Differentiaalipaikannuksen tarkkuuden laskemisen geometria.

Taulukko 1.3: Paikannusvirhe vektorin pituuden ja ratavirheen funktiona. 10 m vastaa *broadcast ephemeris*:n tarkkuutta (muutama vuosi sitten, nyt on parempi), 0.1 m nykyisten tarkkojen ratatietojen (*precise ephemeris*:n) tarkkuutta.

Sivun pituus	Ratavirhe	Paikannusvirhe
1 km	2 m	0.1 mm
10 km	2 m	1 mm
100 km	2 m	10 mm
1000 km	2 m	0.1 m
1 km	0.02 m	0.001 mm
10 km	0.02 m	0.01 mm
100 km	0.02 m	0.1 mm
1000 km	0.02 m	1 mm

1.5.3 GPS-vastaanottimet

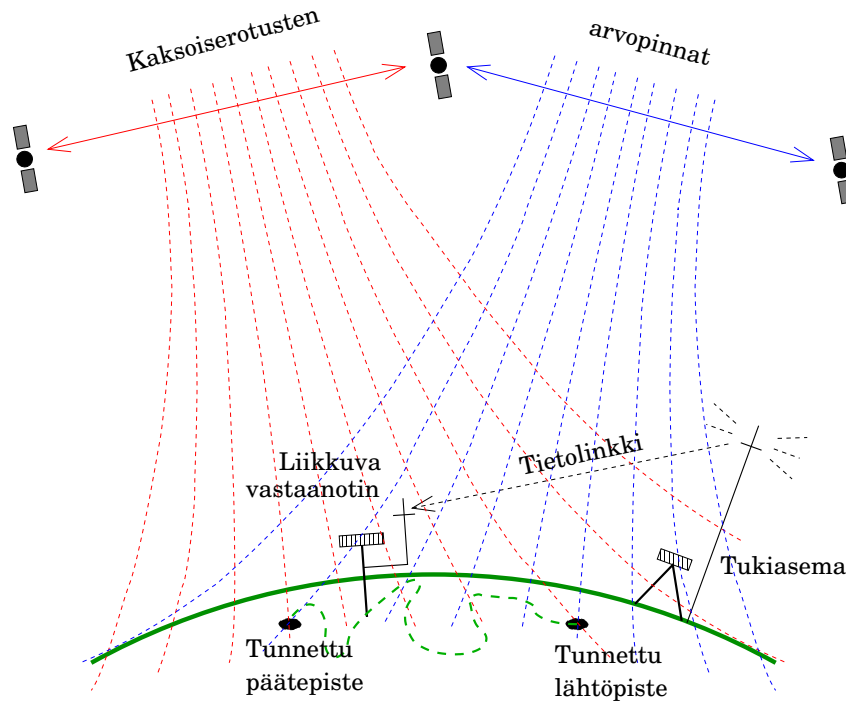
Nykyiset GPS-vastaanottimet osaavat differentiaalipaikannusta sekä kantoaaltojen että koodien avulla suoraan pakkauksesta. Kuitenkin oman tukiaseman perustaminen voi edellyttää firmware-”palikan” hankintaa. Ja tietysti tarvitaan myös tietoliikennelaitteistot (radiomodeemi, matkapuhelin, ...) ”linkin” rakentamiseksi tukiaseman ja mittajaan eli ”roverin” välillä.

1.5.4 GPS-mittaukset kartoituksessa

GIS-GPS määritellään *paikkatietojen keruuna GPS:n avulla*. Sijaintitietojen lisäksi kerätään myös ominaisuustietoja (attribuutteja). Tähän löytyy suhteellisen nopeita, helpon ja edulliset GPS-menetelmät.

- Tarkkuusvaatimukset vaikuttavat käytettävän GPS-menetelmän valintaan
- Usein tarkoitetaan metriluokan (1-10 m) tarkkuustason GPS-mittausmenetelmä, joka kelpaa yleiseen kartoitukseen
- Kun on kyse (käyttömukavuussyistä) tosiaikaisesta paikannuksesta, sijoittuu tämä menetelmä lähellä navigaatiota
- Suosittu ja laajasti sovellettu menetelmä on *differentiaali-GPS* (DGPS), joka perustuu koodihavaintoihin
- Jos vaaditaan paikkatiedolta suurempaa tarkkuutta, käytetään geodeettisen paikanmäärityksen menetelmiä, eli GPS:n tapauksessa *kantoaaltovaihemittauksia*. Silloin käytettävä differentiaalimenetelmä kutsutaan RTK:ksi (Real Time Kinematic), ks. kuva 1.7

1 GIS:n ja GPS:n perusteet

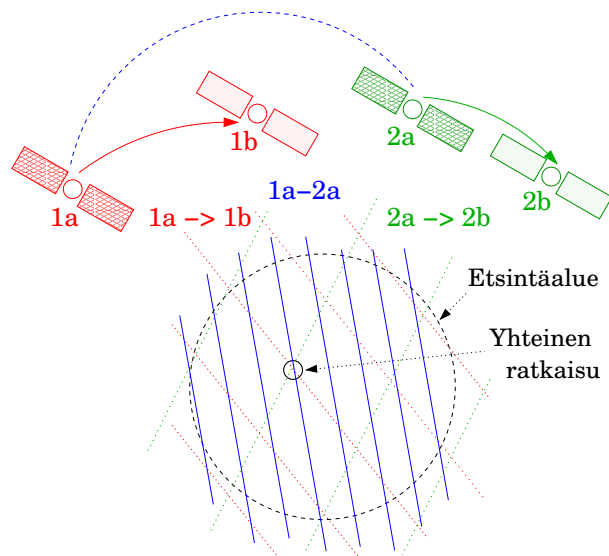


Kuva 1.7: Klassisen RTK-menetelmän toimintaperiaate. Nykyisin käytetään useimmiten tunnettujen pisteiden sijasta ns. “on-the-fly ambiguiteettiratkaisua”, ja myös osittaiset katkokset satelliittiyhteyksiin hoidetaan elegantisti softatasolla.

- Tietysti molemmat tekniikat voidaan käyttää myös ei-tosi aikaisina, jolloin datalinkkia tukiaseman ja mittajaan välillä ei tarvita. Tulokset saadaan silloin *jälkikäsitellyn* avulla.

Paikkatietomittauksissa käytettävä GPS-menetelmä on täytettävä seuraavat vaatimukset (Mäenpää, 1993, muunnellen):

- Tiedonkeruu on oltava mahdollista myös jaloin tai liikkuvalla ajoneuvolla
- Yhden tukiaseman on katettava laaja toiminta-alue. Tähän vaikuttaa valittu tietoliikennetekniikka. Nyk. usein matkapuhelin
- Nykyisin myös useiden tukiasemien ns. virtuaaliratkaisut saatavilla. Laajempi toiminta-alue (jonkin verran) tarkkuuden kustannuksella
- Toisiaikainen mittaus oltava mahdollista, vaikka usein jälkikäsitely riittää
- Mittaus mahdollista kaikissa maasto-olosuhteissa, etenkin ns. “urban canyon” -alueilla, joissa korkeat talot aiheuttavat monta osittaista katkoksia satelliittiyhteyksiin
- Tarkkuus sovelluksesta riippuen 0.05... 10 m
- Jälkikäsitely yksinkertaista ja käyttäjäystävällistä myös suurien tietomäärien ollessa kyse.



Kuva 1.8: "On-the-fly" ambiguiteettiresoluutio. Periaate

2 Teknologiat

2.1 Vastaanotinteknologiat

2.1.1 Geodeettiset vastaanottimet v. huokeat vastaanottimet

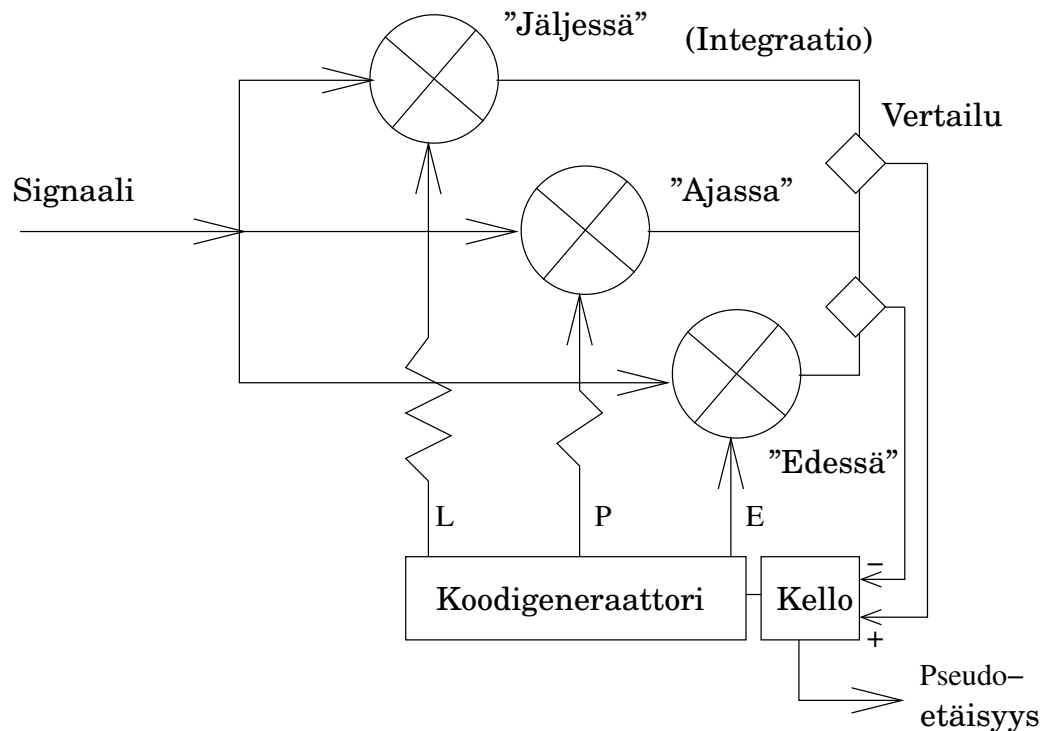
1. Kuluttajatasoiset laitteet
 - a) Edullisia, massatuote
 - b) Käsikäyttöiset GPS-laitteet
 - c) Kortti-GPS laitteet (kaipaavat integrointia)
 - d) "Moduulit" joita voidaan kytkeä suoraan käsimikroon, "GPS-taskut"
2. Ammattitason laitteet
 - a) Huomattavasti kalliimpaa
 - b) Paremmat tarkkuudet; osaa kantaaltovaiheen käsittelyä mm.
 - c) Maastokelpoisuus
 - d) Käytön monipuolisuus, mm. jälkilaskenta (raa'an datan tallennus)

Jako kuluttajataso ja ammattitason laitteiden välillä ei ole absoluuttinen.

2.1.2 Kantaaltovaiheen mittaus

Kantaaltovaiheen mittaus on epätavallinen kuluttajataso laitteessa. Tavallisempi on koodimittaus. Koodimittaus on suhteellisen helposti toteutettavissa käyttämällä *korrelaattori*, joka korreloi vastaanotettua signaalia vastaanottimessa itse generoitujen signaalien kanssa.

Typillisesti käytetään kolme syntetistä signaalia jokaista satelliittia eli PRC-koodia kohtaan: E (early), L (Late) ja P (prompt). Ks. Kuva.



Jos E-korrelaattori antaa korkean arvon, on koodigeneraattorin kello edessa ja sen pitää hidastaa. Jos päinvastoin L-korrelaattori antaa korkeamman arvon, pitää koodigeneraattorin kello nopeuttaa.

Kantoaallon vaiheen harvaitseminen on hankalampaa: siihen käytetään yleensä ns. PLL (Phase Locked Loop). Käytetyin tyyppi on ns. Costas-diskriminaattori. Se havaitsee kantaallon vaiheen poikkeamaa vastaanottimen referenssioskillaattorilta ja ohjaa vastaanottimen referenssitaajuus niin, että ero häviää. Referenssitaajuus havaitaan ja integroidaan kantaaltovaiheen havaintosuureeksi.

Costas-diskriminaattori edellyttää, että koodi on jo poistettu kantaallosta. Sen lisäksi se ei osaa erottaa kantaallon ja miinus kantaallon välillä, mitä merkitsee, että sen ambiguuteetin yksikkö on puoli aallonpituutta, $\lambda/2$.

2.1.3 Prosessori, firmware, ohjelmoitavuus

GNSS-vastaanottimen suunnittelussa paljon ajatustyötä menee siihen, mitkä menetelmät käytetään koodin ja kantaaltovaiheen mittaamiseen ja seurantaan. Tähän vaikuttaa myös käyttötarkoitus: esim. vastaanottimella jota aiotaan käyttää lentokoneessa ("high dynamic" -ympäristö), on oltava paljon "jäykemmät" PLL-loopit, jottei syntyisi ylimääräisiä cycle slippejä. Signaaliherkkyys on vastaavasti pienempi.

Nykyinen kehitys on menossa ohjelmistopohjaisten GNSS-vastaanottimien suuntaan. Softavastaanotin on sellainen, jossa ohjelmakoodi on tavallisen käyttäjän ulottuvilla ja muutettavissa. Jollain tasolla jo nyt useimmat vastaanottimet ovat "softavastaanottimia", sisältäväthän firmware, joka kuitenkin on poltettu read-only muisteihin ja on vain valmistajan muutettavissa.

2.1.4 Softavastaanottimia

Softavastaanotinten etuina voidaan mainita:

- Helppo päivitettävyys
- Kun tulevaisuudessa on olemassa useita (2-4) eri GNSS-järjestelmää, on tarvittava kompleksisuus helpommin toteuttavissa ohjelmistossa kuin raudassa
- Kaikenlainen tekninen kokeilu on helpompaa kun pääsee koodin käsiksi
- Jos vastaanottimen ohjelmisto on ns. Open Source -tyyppinen, sen toiminta ei ole enää ns. musta laatikko, ja
- silloin se on edullinen ja
- suurempi joukko ihmisiä pääsee osallistumaan sen kehitykseen.

Haittana voidaan mainita, että softavastaanotin vaatii hyvin tehokas prosessori. Tämän hetken henkilökohtaiset tietokoneet juuri ja juuri riittävät.

Ks. <http://www.gpscreations.com/NewFiles/GPS1A%20Brochure.pdf>, <http://gps.aau.dk/softgps/esa.pdf>.

2.2 Paikkatietoteknologiat

2.2.1 Tiedonkeruu

Tiedonkeruu koostuu *koordinaattien ja ominaisuustietojen* keruusta.

Koordinaattitiedot kerätään aina tietyssä koordinaattijärjestelmässä. Tiedot käytetystä järjestelmästä on oltava mukana ns. *metatietona*.

Tarkkuus riippuu käyttötarkoituksesta. Suuri tarkkuus ei välttämättä ole kriittinen: kuitenkin *tieto tarkkuudesta* on, ja kuuluu metatietoihin. Eli kerättävät metatiedot ovat:

1. Käytetty koordinaattijärjestelmä
2. Käytetty paikannustapa (DGPS, RTK, ...)
3. Arvioitu tarkkuus (pistekeskivirhe 2-D, 3-D, korkeus, ...) suhteessa mihin?

4. Mittausolosuhteet eli DOP-arvot, mahdollinen peitteisyys, monitie, ...

Tietokoneavusteisessa omaisuustiedon keruussa käytetään ennalta määritetty *lomakepohja* (dictionary, catalog, ...) joka määrittää, mitkä ominaisuudet taltioidaan. Varmistetaan, että

- Kaikki tarpeellinen tieto tulee kerättyä
- Kerätty tieto on loogisesti johdonmukaista
- Kerätty tieto on yhtenäistä.

Ominaisuustieto voi olla kuvaruudussa seuraavan muotoista:

1. Valitaan yksi vaihtoehto listalta, esim. pull-down menu (“rullaverho”)
2. Syötetään numeroarvo
3. Kirjoitetaan tekstikenttä.

Hyvin suunniteltu lomake tarkistaa syötetyn tiedon ainakin muodollista oikeellisuutta, niin pitkälle kuin mahdollista.

Kerätyt geometriset objektit voivat olla

1. Piste
2. Viiva, käyrä tai viivoista koostuva (avoin) polygoni
3. Pinta-ala, rajana (suljettu) polygoni.

Viivojen ja pinta-alojen kohdalla voidaan tarkistaa *topologista oikeellisuutta* eli *eheyttä*, esim.:

- Alueet eivät saa olla päällekkäin
- Alueiden välillä ei saa olla rakoja.

Huomaa, että eheyttä saadaan aikaan vasta paikkatietokantaa rakentaessa. Maastossa kerätty aineisto ei ole eheä, se vaatii topologista siistimistä, joka voidaan ainakin osin tehdä automaattisesti.

2.2.2 Tiedonkeruulaitteivaihtoehdot ja -sovellukset

1. Kannettava mikro (laptop)
2. Kämmenmikro
3. Erikoislaite, karkaistu
4. Alypuhelin t.v.

On myös saatavissa karkaistuja laitteita, joissa pyörii kuitenkin standardiympäristö. Etuna silloin on, että voidaan käyttää tavallisille PC:lle tai kämmenmikrolle kehitetyt ohjelmistot kentällä.

Laittevaatimukset:

1. Kannettavia, kevyitä
2. Karkaistuja, kenttäolosuhteita ja epäasianmukaista käsittelyä kestäviä
3. Näyttö sopiva ulkokäyttöön eri valaistusolosuhteissa; kosketusnäyttö kun ei ole työpöytä
4. Akun kapasiteetti
5. Langaton yhteys mahdollista
6. Käyttäjän ohjelmointi mahdollista: käyttöjärjestelmä jolle löytyy kehitysympäristö (Windows, Linux, vähemmän Symbian). Yleensä käytetään *ristikäntäjä* host-koneella työpöydällä, kun laitteen laskentakapasiteetti rajallinen. Käännetty ohjelma “flashataan” laitteeseen USB-väylän kautta.

2.2.3 Karttapohja ja paikkatietokanta

Kun liikutaan maastossa, on hyödyllistä jos on käytettävissä *karttapohja*. Se voi olla laitteessa mukana, tai sitä voidaan dynaamisesti imuroida karttapalvelimesta. Samoin, jos muokataan osittain paikkatietoja GPS-mittausten aikana ja niiden perusteella, voidaan muutokset tehdä joko paikalliseen paikkatietokannan kopioon, tai verkon kautta keskustietokantaan.

Jos käytetään "kaukaista", paljon yksityiskohtia sisältävää tietokantaa, vaaditaan huolellista suunnittelua, että dataliikenteen määrä ei kasva kohtuuttomaksi, vaikka koko aikaa liikutaan kentällä ja muutetaan yksityiskohtia tietokannassa. Käyttäjälle päin siirretään vain tietokannan maantieteellisiä osia jotka ovat hänelle relevantteja; käyttäjän muokkausten siirto tietokantaan päin on hoidettava sillä tavalla, että ei synny ristiriitoja vaikka useat käyttäjät muokkaavat sitä samanaikaisesti.

2.2.4 Eri käyttömoodit

Paikkatietojen keruu voi tapahtua eri tarkoitukseen, ts. eri käyttömoodeissa:

1. Tiedonkeruu (*alkuperäistietoa, uutta tietoa*). Tässä tapauksessa toimitaan yleensä off-line, eli data vietään tietokantaan myöhemmin.
2. Olemassa olevan tiedon *ylläpito ja päivitys*. Tässä tapauksessa toimitaan jo off-line tai on-line -tilassa. Jälkimmäisessä tapauksessa tietokanta päivitetään verkon yli.
Tässä tapauksessa paikannuksesta on apua kun etsitään paivitettävää kohdetta. Taustakar-ta on hyödyksi. Ellei kerätä uuttakin tietoa, on paikannustarkkuus vähemmän kriittinen.
3. *Mobiili GIS*. Tässä tapauksessa käytetään organisaation olemassa olevaa paikkatietoa on-line ja tosiajassa maastossa hyväksi. Päätelaitteena on useimmiten teollisuusstandardien mukainen mikrotietokone (kämmenmikro, karkaistu kannettava, "maastomikro") jossa pyörii varta vasten laadittu sovellus yleiskäyttöjärjestelmän päällä. Usein sovellukseen liittyy GPS (DGPS, RTK) -paikannus.
4. *Paikannetut palvelut*. Loppukuluttajille suunnatut palvelut. Klassinen esimerkki "löydä läheisin pizzeria ja sen ruokalista". Päätelaitteena matkapuhelin. Sen levinneisyys vielä vaatimaton, mutta *suuret odotukset*. Paikannusmenetelmä usein verkko/solupaikannus (GSM, WLAN), GPS:n käyttö vasta alussa, odottaa GPS-paikannuspiirien hintojen putoamista ¹.

2.3 Tietoliikenneteknologiat

2.3.1 Vastaanottimen ja tiedonkeruulaitteen välillä

Seuraavat perusratkaisut on olemassa:

1. Vastaanotin ja tiedonkeruulaite erikseen; kaapeli
2. Erikseen; langaton yhteys (Bluetooth)
3. Vastaanotin on samalla tiedonkeruulaite.

Jos vastaanotin on jo integroitu *antennin* kanssa, on tämä yhdistelmä yleensä tangon päällä korkealla käyttäjän pään yläpuolella. Tässä tapauksessa vastaanottimen ja tiedonkeruulaitteen integrointi ei onnistu ja on käytettävä kaapeli tai langaton yhteys.

Langattoman yhteyden etuna on mekaanisen osan eliminointi: kaapelit ja liittimet menevät helposti rikki käytössä.

Bluetoothin ongelmana voi olla teknologian keskeneräisyys. Laitteet, jotka on suunniteltu yhteen-toimiviksi yleensä toimivatkin yhteen, muulloin voi syntyä mystisiä ongelmatilanteita.

2.3.2 Liikkuvan vastaanottimen ja tukiaseman välillä

Tähän on olemassa erilaisia ratkaisuja:

1. *One-on-many* eli *broadcast* -ratkaisu: yksi tukiasema palvelee useita liikkuvia käyttäjiä ja lähettää heille tarkasti sama viesti. Tähän tarkoitukseen voidaan käyttää esim. ULA-radiolähetyksiä, RDS-järjestelmän avulla (Radio Data System), joka mm. FOKUS-palvelu käyttää.
2. *One-on-one* eli *singlecast* -ratkaisu: esim. matkapuhelinyhteyden käyttö. Jokainen käyttäjä voi saada itselleen räätälöity viesti, esim. korjausviesti joka pätee lähellä olevaan, matemaattisesti generoituun "virtuaalitukiasemaan". Tämä mahdollistaa myös helppoa laskutusta tarjotuista palveluista.

¹Matkapuhelinteollisuudessa sellaisen lisäpalikan hinta muodostuu jo ylipääsemättömäksi jos se ylittää muutama sentti!

2.3.3 Internet-tiedon saanti

Ei kaikki data joka liikkuva vastaanotinkäyttäjää tarvitse, tulee tukiasemalta. Osa voi tulla Internetiltä, esim. jo mainitut karttataustat. Myös data joka vastaanotin itse saa suoraan satelliiteilta, kuten rataelementit (efemeridit) voi saada kätevämmiin ja/tai nopeammin Internetiltä (Assisted GPS). Kentältä kytkeytyminen Internetiin vaatii yleensä yhteyttä mobiiliverkkoon.

2.3.4 Mobiiliverkot

GSM Global System for Mobile Communications. Alunperin kehitetty äänensiirtoon, mutta kuitenkin digitaalinen. Mahdolliset taajuudet 450, 750, 800, 850, 900, 1800 tai 1900 MHz; yleisimpiä ovat 900 ja 1800 MHz. "GSM-modeemilla" standardisiirtonopeus on 9600 bittiä sekunnissa.

GPRS on GSM:n datalaajennus (General Packet Radio Service) joka tarjoaa siirtonopeuksia 9600 b/s – 115 kb/s.

EDGE (Enhanced Data for Global Evolution) tarjoaa taas kolme kertaa suurempaa datasiirtokapasiteettia GPRS:n verrattuna.

UMTS Universal Mobile Telecommunications System. Ks. WCDMA.

WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access), tärkeä kolmannen sukupolven (3G) matkaviestinteknologia. Kapasiteetti on 50-kertainen GSM-verkon verrattuna ja 10-kertainen GPRS-verkon verrattuna. Siirtonopeus on tyypillisesti 384 kb/s, mutta teknologia mahdollistaa jopa 10 Mb/s.

WIMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), populaarinititys. Protokolla on IEEE 802.16, Wireless MAN (Metropolitan Area Network). Sopii pitemmille matkoille kuin WLAN (useita kilometrejä). Taajuudet alueella 10 – 66 GHz (802.16a), eli suora näköyhteys on tarpeen. Kuitenkin sitä on kehitetty myös taajuuksille 2 – 6 GHz (802.16e). Suomessa 3.5 GHz. Se sopii myös harvaanasuttujen alueiden laajakaistarakaisuksi. Tukiaseman kokonaiskapasiteetti on 75 Mb/s, jota jaetaan käyttäjien kesken.

WLAN (Wireless LAN). Myös "WiFi". Paikallinen langaton Internet-yhteys, protokolla IEEE 802.11. Kapasiteetti vaihtelee. Matka suurimmillaan n. 100 m sisä tai ulkotiloissa. Taajuus 2.4 GHz. Protokolla jokseenkin epävarma eikä periaatteessa sovi tosiaikaisiin sovelluksiin (VoIP).

2.4 Standardit

2.4.1 RTCM SC-104 standardi

Radio Technical Commission for Maritime Services (RTCM) on vuonna 1947 perustettu, riippumaton organisaatio. Jäsenorganisaatioita on yli 100, mm. radionavigaatiolaitteiden valmistajat, valtiolliset elimet joilla on vastuu radiopaikannuksesta, laivanvarustajat, paikannuspalvelujen tarjoajat ja oppilaitokset.

RTCM:n Special Commission 104 suunnitteli standardi GPS-differentiaalitetopalveluksi, joka kantaa nimeä RTCM SC-104 (eli RTCM-104, eli "RTCM"). Nykyinen versio on 2.3².

RTCM:n sanomatyyppit on luetteloitu alle.

²Tämän lisäksi on olemassa version 3.0, joka ei kuitenkaan ole alaspäin yhteensopiva versioiden 2.x kanssa. Se soveltuu lähinnä tosiaikaiseen kinemaattiseen mittaukseen ja käyttää tehokkaampaa datansiirtomekanismia kuin 2.x protokolla.

Message Type	Message Title
1	DGPS corrections
2	Delta DGPS corrections
3	Reference station parameters
4	Carrier surveying information
5	Constellation health
6	Null frame
7	Marine radiobeacon almanacs
8	Pseudolite almanacs
9	High rate DGPS corrections
10	P code DGPS corrections
11	C/A code L1/L2 delta corrections
12	Pseudolite station parameters
13	Ground transmitter parameters
14	Surveying auxiliary message
15	Ionospheric/tropospheric message
16	Special message
17	Ephemeris almanac
18	Uncorrected carrier phase measurements
19	Uncorrected pseudorange measurements
20	RTK Carrier phase corrections
21	RTK pseudorange corrections
22-59	Undefined
60-63	Differential Loran C messages

Data siirretään 30 bitin paketeissa eli *sanoissa*; näistä 24 bittiä on dataa ja 6 bittiä ns. tarkistussumma (pariteetti). Jokainen viesti koostuu vähintään kahdesta sanasta. Viestin ensimmäiset kaksi sanaa kutsutaan *otsikoksi* ja se sisältää kaikille viestityypeille yhteistä informaatiota.

Pariteettibiteistä vielä huomautus, että jokaisen sanan pariteetin oikea ymmärtäminen edellyttää edellisen sanan kahden viimeisen pariteettibitin tuntemista... tämä hankaloittaa koko proseduurin initialisointia.

[2] antaa ohjelmakoodin RTCM-viestin lukemiseksi, sekä monet tekniset yksityiskohdat.

Viestityppi 1:

Otsikko: koostuu kahdesta sanasta, seuraavasti:

Aloitusosa (Preamble)	Viestityyppi	Aseman tunnus (ID)			Pariteetti
8 bittiä	6 bittiä	10 bittiä			6 bittiä
Modifioitu Z-laskuri		Järjestysnumero	“Frame”:n pituus	Aseman tervetiedot	Pariteetti
13 bittiä		3 bittiä	5 bittiä	3 bittiä	6 bittiä

Datatieueet: sana 3...n, seuraavasti:

Skaa- laus	UDRE	Sat ID	PRC			Pariteetti	
1	2	5	16			6	
RRC		IOD		Skaa- laus	UDRE	Sat ID	Pariteetti
8		8		1	2	5	6
PRC				RRC		Pariteetti	
16				8		6	
IOD		Skaa- laus	UDRE	Sat ID	PRC (msb)		Pariteetti
8		1	2	5	8		6

jne...

Selostus:

- Modifioitu *Z*-laskuri: tämä on korjauksen *epochki* eli hetki jolla se on määritetty. Yksikkö sekunteina tunnin sisällä (huomaa, että käytetty aikaskaala on GPS-aika eikä UTC-aika!)
- Aseman terveystiedot: jos eroaa nolasta, asemaa ei kannata käyttää. 6 (110) tarkoittaa, että lähetystä ei monitoroida. 7 (111): asema epäkunnossa.
- Skaalaus
0: PRC:n yksikkö on 0.02 m ja RRC:n yksikkö 0.002 m/s
1: PRC:n yksikkö on 0.32 m ja RRC:n yksikkö 0.032 m/s
- UDRE: User Differential Range Error Index: 1σ virhe-indikaattori:

UDRE-koodi	1σ -virhe
11	> 8 m
10	≤ 8 m
01	≤ 4 m
00	≤ 1 m

- Sat ID: Satelliitin tunnus
- PRC: Pseudoetäisyyden korjaus, msb = most significant byte eli vasemmanpuoliset 8 bittiä
- RRC: pseudoetäisyyden muutosnopeuden korjaus
- IOD: Issue of Data. Mihin broadcast-ratatietoihin korjaustiedot perustuvat

Viestityyppi 2: Erotukset kahden eri IOD:n laskettujen korjaustiedon välillä.

Viestityyppi 3: Tukiaseman koordinaatit

Viestityyppi 5: Satelliittikonstellaation tila

Viestityyppi 6: Tyhjä viesti, tietoliikennelinkin testaamista varten

Viestityyppi 9: Korjaustiedot ryhmiteltyinä kolmen satelliitin ryhmiin. Näin niiden saannin tahti on nopeampi

Viestityyppi 15: Ionosfäärikorjaus

3 Kantoaaltovaihemittaukset ja paikkatietosovellukset

3.1 Yleistä

Oheismateriaaliksi kelpaavat seuraavat artikkelit: [7, 10] ja oppikirjat: [9, 5].

Kantoaaltovaihemittaukset ja näissä esiintyvä ambiguuteettiresoluutioproblematiikka on ja mainittu.

Kun koodin pseudoetäisyydet voidaan kirjoittaa seuraavasti:

$$p = \rho + c(\Delta t - \Delta T) + d_{\text{ion}} + d_{\text{trop}}, \quad (3.1)$$

voidaan kantoaaltovaihehavainnot kirjoittaa seuraavasti:

$$P = \lambda \left(\frac{\phi}{2\pi} \right) = \rho + c(\Delta t - \Delta T) + D_{\text{ion}} + D_{\text{trop}} + \lambda N, \quad (3.2)$$

jossa ϕ on mitattu vaihekulma (mukaan lukien viimeisen signaalin vaiheen lukituksen jälkeen lasketut kokonaiset vaihesykli), N ambiguuteetiluku, Δt satelliitin, ΔT vastaanottimen kellovirhe,

$$\rho = \sqrt{(x - X)^2 + (y - Y)^2 + (z - Z)^2},$$

satelliitin ja vastaanottimen välinen geometrinen etäisyys, ja D_{ion} ja D_{trop} iono- ja troposfäärin aiheuttamat propagaatioviiveet. (Itse asiassa $D_{\text{ion}} = -d_{\text{ion}}$ ja $D_{\text{trop}} = d_{\text{trop}}$.) λ on aallonpituus (tai puoliaallonpituus).

3.2 GPS-vaihemittauksen virhelähteet

Tärkeimmäksi virhelähteiksi voidaan mainita

- Radat
- Satelliittien kellovirhe
- Ionosfääri
- Troposfääri
- Monitieheijastukset
- Laitteen vaihemittauksen epätarkkuus

Seuraava taulukko antaa niiden suuruusluokka ja luonne.

Virhelähde	Luonne	Suuruus	Suuruus diff. mittauksessa	Eliminointi
Satelliittirata	Geometrinen	~1 m	~4 mm/100 km	Tarkat radat (Precise ephemerides)
Sat. kellovirhe	Vakio	metrejä	0	Vast. väliset erotukset
Ionosfääri	Stok. prosessi	±10 m	~1 cm/100 km	Kaksi taajuutta L1, L2
Troposfääri	Stok. prosessi	±10 cm	~1 cm/100 km	Estimoidaan, $1/\cos \zeta$
Monitie	Paikallinen	~1 cm	sama	?
Laitteen epätarkkuus	Paikallinen	mm – cm	sama	Teknologia

Tämän taulukon lisäksi seuraavat seikkaperäiset selitykset.

3.2.1 Satelliittien ratavirhe

Jos käytetään satelliittien itse lähettämät ratatiedot, voidaan satelliittien paikat avaruudessa laskea noin ± 1 m tarkkuudella. Tämä on jo huomattava parannus aikaisemmasta tilanteesta, jolloin ratavirheet olivat luokkaa 10 m.

Absoluuttisessa paikannuksessa tämä ratavirhe kulkee suoraan laskettuun paikkaan, vaikka tietenkin useiden satelliittien käyttö (enemmän kuin minimimäärä 4) vähentää kokonaisvirhetä keskiarvostamalla. Toisaalta *differentiaalipaikannuksessa* eli tukiasemaa käyttäessä voidaan eliminoida tästä virheestä suurin osa. Tukiasema määrittää ratavirheistä aiheutuvat pseudoetäisyysvirheet ja lähettää ne liikkuvalla käyttäjälle. Jos liikkuva käyttäjä on lähellä tukiasemaa, on hänen pseudoetäisyyden virhe sama kuin tukiaseman; kun etäisyys tukiasemasta kasvaa, kasvaa myös kahden pseudoetäisyyden välinen erotus, joka menee kokonaan liikkuvan vastaanottimen paikkaan paikannusvirheena.

Nykyisin on käytävissä tarkkojen ratojen (*precise ephemeris*) lisäksi ns. Rapid Orbits, muutaman tunnin tai jopa alle tunnin sisällä. Tosi aikaiseen paikannuskäyttöön nämäkään eivät kelpaa, mutta niistä on hyötyä mm. sääennusteiden laskennassa ("GPS-meteorologia").

3.2.2 Satelliittien kellovirhe

Tämä eliminoiduu kahden vastaanottimen välisessä erotuksessa, eli differentiaalipaikannuksessa se eliminoiduu täysin.

3.2.3 Ionosfääri

Ionosfäärin vaikutus eliminoidaan täysin käyttämällä kaksitaajuusvastaanotinta.

Jos on käytettävissä vain yksitaajuusvastaanotin (vielä halvempi tällä hetkellä, mutta kuinka kauan?), auttaa ionosfäärin *mallinta*. Tosiajassa tämä on haastava mutta mahdollinen. Jos tukiasema on kaksitaajuinen, voi se laskea sopivia ionosfäärikorjauksia, jotka ovat voimassa tukiaseman jonkin kokoisessa ympäristössä. Virhe kasvaa etäisyyden mukaan tukiasemasta.

3.2.4 Troposfääri

Troposfäärin vaikutus on sama molemmalla taajuudella, siis *ei-dispersiivinen*. Sitä ei voida eliminoida käyttämällä kaksi taajuutta. Kuitenkin se eliminoiduu likimäärin differentiaalimittauksesta, jos etäisyys tukiasemasta on lyhyt.

Troposfäärin refraktiivinen vaikutus on kääntäen verrannollinen satelliitin zenitikulman ζ kosiniin:

$$d_{\text{trop}} = \frac{d_{\text{trop,zenit}}}{\cos \zeta}$$

, jossa $d_{\text{trop,zenit}}$ on ns. zeniittitroposfääriviive, paikan hitaasti ajassa muuttuva ominaisuus. Jos on käytettävissä viisi tai enemmän satelliittiä, voidaan $d_{\text{trop,zenit}}$ estimoida *GPS-havainnoista*. Ainakin erotus

$$d_{\text{trop,zenit,base}} - d_{\text{trop,zenit,rover}}$$

olisi estimoitavissa ja näin eliminoidavissa. Kuitenkin lisätuntematon heikentää ratkaisua etenkin korkeussuunnassa.

3.2.5 Monitie

Monitie on hankalasti eliminoidava häiriötekijä. Kantoaaltovaihemittauksessa se on huomattavasti pienempää kuin koodimittauksessa, kuitenkin edelleen pahimmillaan senttimetrejä.

GPS-signaali on *polarisoitu* sirkulaarisesti. Polarisaatiotaso kiertää oikeaan päin. Heijastuksen jälkeen taso kiertää vasempaan päin. Sirkulaarisesti polarisoitu säteily voidaan katsoa koostuvan kahdesta lineaarisesti polarisoidusta säteestä, joiden suunnat ovat keskenään kohtisuoria ja joiden välillä on vaihe-ero $\lambda/4$.

GPS-antennit suunnitellaan niin, että ne ottavat vastaan vain oikeaanpäin polarisoitua radiosäteilyä. Esim. ristidipoliantenni (jossa on kaksi dipoli-elementtiä jotka ovat molemmat vaakatasossa) vastaanottaa kaksi kohtisuoraa komponenttia ja "sekoittaa" ne $\lambda/4$ vaihe-erolla, jolloin oikeaanpäin polarisoidun signaalin molemmat komponentit vahvistavat toinen toistaan, mutta vasempaan päin polarisoidun heijastussignaalin komponentit kumoavat toinen toistaan.

Tämä toimii hyvin niin kauan kuin sisään tulevat aallot tulevat zeniitin läheltä. Horisontin lähellä olevista lähteistä antenni vastaanottaa vain yksi komponentti, se joka on polarisoitu horisontin suuntaiseksi. Se on sama heijastetussa kuin alkuperäisessä signaalissa.

Monitiehäiriöiden minimoimiseksi on siis vähennettävä matalien signaalien vaikutusta. Seuraavasti:

- Fysikaalisesti, suunnitteleamalla antenni, jonka herkkyys pienenee jyrkästi horisontin lähellä (ja on lähellä nolla negatiivisille korkeuskulmille)
- Ohjelmistotasolla, hylkäämällä tai vähentämällä paino laskennassa jos satelliitilla on
 1. matala korkeuskulma, tai
 2. matala S/N (signaali-kohina) suhde, yleensä myös johtuen korkeuskulmasta.

Molemmat tekniikat toimivat. Valitettavasti myös korkealla taivaalla oleva satelliitti voi aiheuttaa heijastuksia, jotka saapuvat antenniin melkein vaakasuunnassa. Siksi molemmat menetelmät ovat tarpeellisia. Ensimmäinen voi olla vaikea, jos vaatimuksena on myös, että antenni on oltava kompakti ja kevyt, kuten yleensä GIS-sovelluksissa.

3.2.6 Laitteen kohinataso

Tärkeä varoitus: tässä "kohina" tarkoittaa antennin, vastaanottimen ja ympäristön aiheuttama taustasäteily, joka sekoittuu vastaanotettuun signaaliin. Puhutaan S/N suhteesta eli signaali-kohinasuhteesta. *Tämän lisäksi* puhutaan usein *mittaussuureen*, eli pseudo-etäisyyden, satunnaisesta epävarmuudesta eli "kohinasta", joka ainakin osittain johtuu ym. elektronisesta kohinasta.

Kohinataso on osittain laadun kysymys: paremmat (hinnakkaammat) laitteet suoriutuvat paremmin. Kuitenkin tämä ei ole ainoa asia. Se on myös softakysymys: sisäänrakennettu softa (firmware) tekee tiettyjä oletuksia siitä, minkälaisessa ympäristössä laite tullaan käyttämään.

Esim. lentokoneessa käytettävä laite on otettava huomioon, että kone voi manöveroida ja sitten signaalin vastaanottoaajuus voi Doppler-ilmiön seurauksena yht'äkkiä muuttua. Sellaiseen ympäristöön rakennettu laite vastaanottaa signaalin leveämmästä taajuuskaistasta ja sen S/N suhde on siksi heikompaa. Sanotaan myös, että sellaisen "high-dynamic" -laitteen CTR (Carrier Tracking Loop) on "löysempi" kuin low-dynamics -laitteen vastaava.

3.3 Havaintojen kuvaus ja käsittely

3.3.1 Vaihemittaus

Toisin kuin GPS-signaaliin moduloidut pseudosatunnaiskoodit, joiden "aallonpituudet" ovat 30 m (P-koodi) ja 300 m (C/A-koodi,) ovat GPS-signaalin kantoaaltojen aallonpituudet 19 cm (L1) ja 24 cm (L2). Tämä merkitsee, että vaihemittaus, joka mittaa vaihekulman vaikkapa yhden asteen eli $1/360$ kierroksen tarkkuudella, mittaa itse asiassa *metristä* pseudoetäisyyttä $19\text{ cm}/360 = 0.5\text{ mm}$ tai $24\text{ cm}/360 = 0.7\text{ mmtarkkuudella}$.

Myös kantoaaltovaihemittaus voidaan katsoa pseudoetäisyyden mittaukseksi, kun kerrotaan mitattu vaihekulma ϕ suurella $\lambda/2\pi$ tai $\lambda/360$, riippuen siitä, annetaanko vaihekulma radiaaneissa tai asteissa. Jos, kuten on tapana, vaihekulma annetaan sykleina, on kerroin yksinkertaisesti λ .

Vaihemittauksiin ominaista on, että vaihekulmaa voidaan määrittää vain *modulo* yksi aallonpituus. Kuitenkin, niin kauan kuin lukitus satelliittisignaaliin säilyy, säilyy myös tämä tuntematon kokonaisuus aallonpituuksia vakiona. Jos lukitus katkeaa, puhutaan vaihekatkoksesta ("cycle slip").

Jotkut laitteet on rakennettu näin, että ne voivat määrittää vaihekulmaa vain modulo *puoli aallonpituus*¹. Silloin on käytettävä $\lambda/2$ λ :n sijaan ambiguiteettiratkaisussa.

3.3.2 RTCM-protokolla ja kantoaaltovaiheet

RTCM SC-104 (eli RTCM-104, eli “RTCM”), nykyinen versio 2.3, sisältää myös viestityyppejä kantoaaltovaihemittauksen käyttämiseksi: tyypit 18-21.

Viestityyppi	Viestin nimi
18	Korjaamattomat kantoaallon vaiheen mittaukset
19	Korjaamattomat pseudoetäisyyden mittaukset
20	RTK kantoaallon vaiheen korjaukset
21	RTK pseudo-etäisyyskorjaukset

Kuten näkyy, voidaan siirtää sekä alkuperäiset vaihehavainnot että korjaustiedot (eli erotukset havaittujen vaihekulmien ja ratatiedoista ja tukiaseman sijainnista laskettujen vaihekulmien välillä).

3.3.3 NTRIP-protokolla

NTRIP on “Networked Transport of RTCM via Internet Protocol”. Se on aika nuori protokolla, joka mahdollistaa myös korjausten jakelua langattomasti, esim. GPRS-matkapuhelinverkon kautta.

NTRIP perustuu tcp/ip protokollaan, tarkemmin: http (hypertext transfer protocol), eli korjaustiedot voidaan jakella samalla tavalla kuin verkkosivut. Itse asiassa NTRIP-palvelin on “viritelty” www-palvelin: on kyse tosiaikaisesta “streaming” -datasta, samalla tavalla kuin musiikin jakelu Internetin kautta. Ks. [1].

V. 2004 NTRIPistä tuli RTCM-standardi. Sitä käytetään mm. Geotrimin koko Suomea kattavassa VRS-referenssiverkossa.

3.3.4 Ambiguiteettien ratkaiseminen

Tämä on palapeli, johon löytyy monia temppuja. Päävaatimus on riittävä redundanssi. Kirjassa [8], luvussa 6.5, tilanne analysoidaan.

Jos miellä on n satelliittia kahden vastaanottoaseman välisen vektorin ratkaisemiseksi, voimme muodostaa $n - 1$ kaksoiserotusta, joista jokainen sisältää yksi tuntematon, kokonaislukuarvoinen ambiguiteetti. Sitä voidaan kirjoittaa vaikkapa symbolilla

$$\nabla^{ij} \Delta N,$$

jossa i ja j ovat satelliittipari, jonka suhteen satelliittien välinen erotus lasketaan.

1. Kaikki mahdolliset, reaaliarvoiset $\nabla^{ij} \Delta N$ -yhdistelmät muodostavat $n - 1$ -ulotteinen lineaarinen vektoriavaruus, jonka yksi elementti voidaan kirjoittaa muotoon $\nabla \Delta N$.
2. Tämän avaruuden sisällä voidaan rajoittaa mahdolliset $\nabla \Delta N$ -arvot rajalliseen alueeseen: kantoaaltovaiheen lisäksi on käytettävissä samojen maa-asemien ja satelliittien koodipohjaiset pseudoetäisyydet, jotka *eivät* sisällä mitään ambiguiteettia. Niiden tarkkuus on toki paljon heikompi. Kaavojen 3.1, 3.2 perusteella (unohtaen ilmakedä)

$$P \approx p + \lambda N,$$

josta seuraa

$$\nabla \Delta N \approx (\nabla \Delta P - \nabla \Delta p) / \lambda.$$

Näin läpi käytävä “etsintäavaruus” on paljon pienempi: vain tämän pisteen tietyn kokoinen ympäristö. Alueen koko riippuu koodimittausten laadusta eli koodipseudoetäisyyksien epävarmuudesta.

¹Nimittäin, jos Carrier Tracker Loop käyttää ns. Costas-diskriminaattori, joka toimii sitä huolimatta, että kantoaallon päälle on moduloituna kaikenlaisia 180° (eli π) vaihekääntöjä sisällyttäviä koodauksia, mm. 50 Hz:n ratatietoviesti.

3. Käytännössä tuntemattomat ovat kaksoiserotusratkaisussa vain maa-asemien välisen avaruusvektorin kolme komponenttia; toisin sanoen, ratkaisu on oltava *tiety* $n - 1$ -ulotteisen avaruuden *kolmiulotteisen aliavaruuden sisällä*.

Käytetyimmät ambiguiteettiratkaisumenetelmät, kuten kuuluisa LAMBDA-menetelmä, perustuvat tähän.

3.3.5 Eri ambiguiteettiratkaisumenetelmät

Käytännön ratkaisumenetelmä käy kolmea vaihetta läpi:

1. Muodostetaan mahdollisten kokonaislukutuntematon-yhdistelmien avaruus
2. Etsitään tästä avaruudesta optimaalinen ("paras") ratkaisu
3. Varmistetaan, että todellinen ratkaisu on (suurella todennäköisyydellä) juuri tämä eikä "toiseksi paras" ratkaisu (Kontrastisääntö).

Lyhyille *vektoreille voidaan ratkaistaa erikseen*

Widelane, "Leveäkaista-ratkaisu", ts. $\phi_1 - \phi_2$, eli metrisiksi yksiköiksi

$$L_5 = \frac{f_1 P_1 - f_2 P_2}{f_1 - f_2} = \frac{\lambda}{2\pi} (\phi_1 - \phi_2).$$

Tämän tehollinen aallonpituus on

$$\lambda_5 = (\lambda_1^{-1} - \lambda_2^{-1})^{-1} = 86 \text{ cm}.$$

Koska aallonpituus on niin pitkä, on kokonaisluvun yksiselitteinen löytäminen helpompaa: jos koodiperusteinen pseudoetäisyyden toleranssi (maksimivirhe) on $\ll \frac{1}{2}\lambda_5$, riittää se L_5 -ambiguiteetin $N_5 = N_1 - N_2$ laskemiseksi.

Pitkille *vektoreille taas on olemassa*

Melbourne-Wübbena -havaintosuure:

$$L_{MW} = \frac{1}{f_1 - f_2} (f_1 P_1 - f_2 P_2) - \frac{1}{f_1 + f_2} (f_1 p_1 + f_2 p_2).$$

Tässä on käytetty sama notaatio kuin aikaisemmin, eli p_1, p_2 ovat koodi-pseudoetäisyshavainnot, ja P_1, P_2 vaihe-pseudoetäisyshavainnot, molemmat *metrisissa yksiköissä*. Tämän käyttö edellyttää kohtalaisen hyvien koodihavaintojen olevan käytettävissä molemmalla taajuudella. L_{MW} :n tehollinen aallonpituus on myös 86 cm.

Sekä widelane- että MW -havaintosuure voidaan periaatteessa käyttää reaaliaikaisissa mittauksissa. Kuitenkin jälkimmäistä käytetään yksinomaan hyvin pitkien staattisten vektorien ratkaisemiseksi.

3.3.6 Vaihetuettu koodimittaus

Tässä menetelmässä ("pseudorange smoothing") otetaan absoluuttinen pseudoetäisyys koodimittauksesta, mutta sen aallonpituuden murto-osa vaihemittauksesta. Kulostaa helpommaksi kuin on. Ks. [9] sivu 161.

Erityisesti kinemaattisissa GPS-sovelluksissa tämä on suositeltava toimenpide: koodimittaukset eivät sisällä ambiguiteetteja, mutta taas kantoaaltovaihemittaukset ovat paljon kohinattomampia. Oletetaan, että meillä on havaintoina koodihavainnot p_1 ja p_2 (metrisia yksiköitä) ja kantoaallon vaiheet ϕ_1 ja ϕ_2 (kulmayksiköitä), aikana t .

Ensin konstruoidaan *ennustusyhtälö* tämän hetken (*a priori*) pseudoetäisyydelle käyttämällä edellistä, eli

$$p^-(t_i) = p(t_{i-1}) + \frac{\lambda}{2\pi} (\phi(t_i) - \phi(t_{i-1})). \quad (3.3)$$

Tämä yhtälö pätee molemmille taajuudelle 1 ja 2, sekä myöskin "widelane" havaintosuureisiin, joita määritetään seuraavasti:

$$p_{WL} = \frac{f_1 p_1 - f_2 p_2}{f_1 - f_2}, \quad \phi_{WL} = \phi_1 - \phi_2.$$

3 Kantoaaltovaihemittaukset ja paikkatietosovellukset

Huomaa, että yhtälöä (3.3) voidaan tulkita Kalman-suotimen *dynaamiseksi yhtälöksi*: tila on $p(t)$ ja tilan varianssimatriisia voidaan kutsua $P^-(t)$. Vaihekorjaustermi $\phi(t_i) - \phi(t_{i-1})$ voidaan katsoa *tunnetuksi* koska se on koodihavaintojen verrattuna tarkka.

Seuraavaksi lisätään tähän Kalman-suotimeen *havaintoyhtälö*: yksinkertaisesti tämän hetken $p(t_i)$ havainto, jonka tarkkuudeksi voidaan kirjoittaa R_i . Nyt *korjausyhtälö* on

$$p^+(t_i) = p^-(t_i) + KH(p^-(t_i) - p(t_i)),$$

jossa $H = [1]$, $K = -P^-H^T(HP^-H^T + R)^{-1} = -P^-/(P^- + R)$, ja siis

$$p^+(t_i) = \frac{R_i}{P^-(t_i) + R_i}p^-(t_i) + \frac{P^-(t_i)}{P^-(t_i) + R_i}p(t_i).$$

Siis: *a posteriori* pseudoetäisyys on painotettu lineaariyhdistelmä toisaalta ennustetun ja “carrier-smoothed”, toisaalta suoraan havaitun pseudoetäisyyden välillä.

Varianssien kasautumiseksi löydetään

$$P^+(t_i) = (I + KH)P^-(t_i) = \frac{R_i}{P^-(t_i) + R_i}P^-(t_i).$$

Näemme, että kun *a priori* tilavarianssi on vielä heikko, parannus on huomattava; kun tilavarianssi paranee, pienenevät myös havaintojen tuomat parannukset.

(Dynaamisen mallin varianssin kasautuminen on yksinkertaisesti: $P^-(t_i) = P^+(t_{i-1})$.)

On mahdollista *testata cycle slipejä* tässä menetelmässä: testattava suure on erotus

$$(p^-(t_i) - p(t_i)),$$

jonka keskivirhe on tiedossa:

$$\sigma = \sqrt{HP^-H^T + R} = \sqrt{P^- + R}.$$

Tämä tulee toimimaan parhaiten wide lane -lineaariyhdistelmää käyttäessä, sen suuren tehollisen aallonpituuden vuoksi, 86 cm.

Tämä Kalman-suodin voi pyöriä jatkuvana prosessina vastaanottimen sisällä (tai jälkikäsitteilyohjelmiston sisällä, mutta ilman tosiaikaisuutta). Kalman-suotimen tulos $p^+(t_i)$, $i = 1, \dots$ on huomattavasti sileämpää kuin alkuperäiset mittaukset $p(t_i)$.

3.4 Mittausmenetelmät ja -geometriat

RTK-menetelmää voidaan käyttää kahdella eri tavalla eli geometrialla:

1. Käyttämällä yksi tukiasema
2. Käyttämällä tukiasemien verkko.

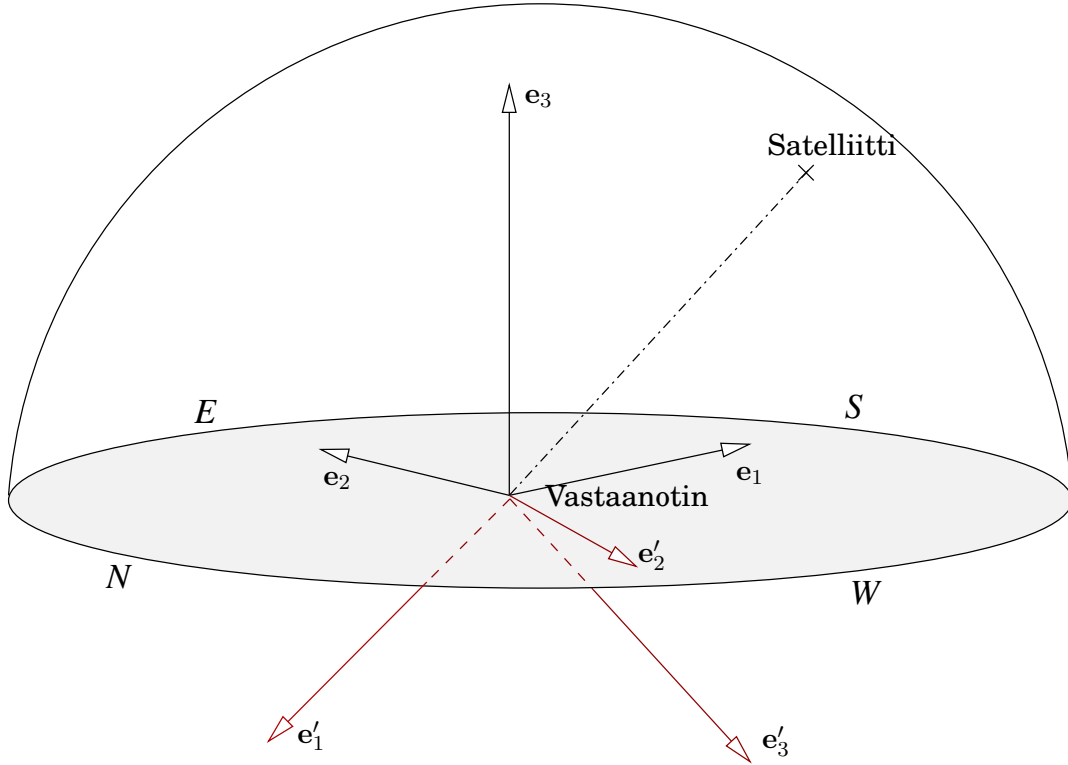
Seuraavassa käytetään notaatio $\{e_1, e_2, e_3\}$ merkitsemään ortogonaalia yksikkövektorikolmikkoa. Jokaista vektoria avaruudessa voidaan kirjoittaa näiden kantavektorien lineaariyhdistelmänä. Paikallisessa horisonttijärjestelmässä vektori e_1 osoittaa etelään, e_2 itään ja e_3 ylöspäin zeniittiin.

Ensin käsitellään, miten GPS-satelliittien rata- ja kellovirheet kulkevat paikannusratkaisuun yhden tukiaseman tapauksessa; sitten kolmen tukiaseman tapauksessa.

3.4.1 Yksi tukiasema

Yhden tukiaseman tapauksessa voidaan kirjoittaa havaintosuure seuraavaksi, unohtamalla hetkeksi ilmakehä ja muut häiriötekijät:

$$P = \sqrt{(x - X)^2 + (y - Y)^2 + (z - Z)^2} + c(\Delta t - \Delta T) + \dots$$



Kuva 3.1: Geometria yhden tukiaseman tapauksessa

Tässä $x\mathbf{e}_1 + y\mathbf{e}_2 + z\mathbf{e}_3$ on satelliitin, $X\mathbf{e}_1 + Y\mathbf{e}_2 + Z\mathbf{e}_3$ vastaanottimen paikkavektori, kun $\{\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3\}$ on ortogonaalinen yksikkövektorikolmio. Ilmaisu

$$\rho = \sqrt{(x - X)^2 + (y - Y)^2 + (z - Z)^2}$$

on geometrinen etäisyys satelliitin ja vastaanottimen välillä.

Olkoon ratavirheet (tai niiden vaikutus satelliitin paikkaan avaruudessa) $\Delta x, \Delta y, \Delta z$, ja satelliitin kellovirhe Δt (jo oletetusti pieni). Niiden vaikutus pseudoetäisyyteen on

$$\Delta P = \frac{\partial P}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial P}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial P}{\partial z} \Delta z + c\Delta t. \quad (3.4)$$

Valitaan nyt *vaihtoehtoinen* kolmiulotteinen yksikkövektorikolmio, jossa \mathbf{e}'_1 osoittaa satelliitista tukiasemaan, ja \mathbf{e}'_2 ja \mathbf{e}'_3 ovat keskenään ja \mathbf{e}'_1 :ta kohtaan kohtasuoria². Olkoon

$$\rho_0 = \sqrt{(x - X_0)^2 + (y - Y_0)^2 + (z - Z_0)^2}$$

satelliitin ja tukiaseman $X_0\mathbf{e}'_1 + Y_0\mathbf{e}'_2 + Z_0\mathbf{e}'_3$ välinen etäisyys; olkoon lisäksi liikkuvan vastaanottimen ("roverin") paikka $X\mathbf{e}'_1 + Y\mathbf{e}'_2 + Z\mathbf{e}'_3 = (X_0 + \xi)\mathbf{e}'_1 + (Y_0 + \eta)\mathbf{e}'_2 + (Z_0 + \chi)\mathbf{e}'_3$. Tässä ξ, η ja χ ovat nyt roverin koordinaatit tukiaseman suhteen yllä sovitussa koordinaatistossa. Tukiaseman ja roverin välinen etäisyys on

$$s = \sqrt{\xi^2 + \eta^2 + \chi^2}.$$

Lasketaan kaava (3.4) auki. Saadaan

$$\Delta P = \frac{x - X}{\rho} \Delta x + \frac{y - Y}{\rho} \Delta y + \frac{z - Z}{\rho} \Delta z + c\Delta t,$$

²Siis: $\mathbf{e}'_1 = -\cos A \sin z \mathbf{e}_1 - \sin A \sin z \mathbf{e}_2 - \cos z \mathbf{e}_3$, $\mathbf{e}'_2 = \sin A \mathbf{e}_1 - \cos A \mathbf{e}_2$, $\mathbf{e}'_3 = -\cos A \cos z \mathbf{e}_1 - \sin A \cos z \mathbf{e}_2 + \sin z \mathbf{e}_3$.
Eli

$$\begin{bmatrix} \mathbf{e}'_1 \\ \mathbf{e}'_2 \\ \mathbf{e}'_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos A \sin z & -\sin A \sin z & -\cos z \\ \sin A & \cos A & 0 \\ -\cos A \cos z & -\sin A \cos z & \sin z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{e}_1 \\ \mathbf{e}_2 \\ \mathbf{e}_3 \end{bmatrix}.$$

Tässä esiintyvä matriisi on ortogonaalinen eli $RR^T = R^T R = I$.

3 Kantoaaltovaihemittaukset ja paikkatietosovellukset

siis erikseen tukiasemalle ja roverille

$$\begin{aligned}\Delta P_0 &= \frac{x - X_0}{\rho_0} \Delta x + \frac{y - Y_0}{\rho_0} \Delta y + \frac{z - Z_0}{\rho_0} \Delta z + c \Delta t \\ \Delta P &= \frac{x - X}{\rho} \Delta x + \frac{y - Y}{\rho} \Delta y + \frac{z - Z}{\rho} \Delta z + c \Delta t.\end{aligned}$$

Erotus, eli roverin paikannuksen virhe joka johtuu tukiaseman etäisyydestä, on

$$\Delta P - \Delta P_0 = \left(\frac{x - X}{\rho} - \frac{x - X_0}{\rho_0} \right) \Delta x + \left(\frac{y - Y}{\rho} - \frac{y - Y_0}{\rho_0} \right) \Delta y + \left(\frac{z - Z}{\rho} - \frac{z - Z_0}{\rho_0} \right) \Delta z$$

Tästä satelliitin kellovirhe on hävinnyt.

Tutkitaan kerrointa

$$\left(\frac{x - X}{\rho} - \frac{x - X_0}{\rho_0} \right)$$

lähemmin. Jos määritetään funktio

$$f(X) \equiv \frac{x - X}{\rho(x, X, y, Y, z, Z)},$$

on yo. kerroin

$$\begin{aligned}f(X) - f(X_0) &\approx \left. \frac{\partial f}{\partial X} \right|_{X=X_0} (X - X_0) + \frac{1}{2} \left. \frac{\partial^2 f}{\partial X^2} \right|_{X=X_0} (X - X_0)^2 + \dots = \\ &= \left. \frac{\partial f}{\partial X} \right|_{X=X_0} \xi + \frac{1}{2} \left. \frac{\partial^2 f}{\partial X^2} \right|_{X=X_0} \xi^2 + \dots\end{aligned}$$

(Taylor-kehitemmä). Jos tästä otetaan vain ensimmäinen termi, saadaan

$$\left. \frac{\partial f}{\partial X} \right|_{X=X_0} = -\frac{1}{\rho_0} + \frac{(x - X_0)^2}{\rho_0^3},$$

ja

$$\Delta P - \Delta P_0 = \left(-\frac{1}{\rho_0} + \frac{(x - X_0)^2}{\rho_0^3} \right) \xi \Delta x + \left(-\frac{1}{\rho_0} + \frac{(y - Y_0)^2}{\rho_0^3} \right) \eta \Delta y + \left(-\frac{1}{\rho_0} + \frac{(z - Z_0)^2}{\rho_0^3} \right) \chi \Delta z.$$

Koska koordinaattiakselit on määritetty yo. tavalla, on

$$\begin{aligned}x - X_0 &= -\rho_0, \\ y - Y_0 &= 0, \\ z - Z_0 &= 0,\end{aligned}$$

ja saamme

$$\Delta P - \Delta P_0 = -\frac{1}{\rho_0} \eta \Delta y - \frac{1}{\rho_0} \chi \Delta z. \quad (3.5)$$

Näky, että virhe on lineaarisesti verrannollinen etäisyyteen tukiasemalta, ja että *vain etäisyys sivusuunnassa satelliitin suuntavektoriin nähden vaikuttaa*.

3.4.2 Kolmen tukiaseman tapaus

Koska tukiasemien verkon tapaus voidaan yleensä redukovia kolmen tukiaseman tapaukseen, tutkimme vain tämä.

Lähdemme yllä johdetuista kaavoista. Kaava 3.5 on *lineaarinen* parametreissa η ja χ , jotka voimme tulkita vaakatason koordinaateina kahdessa eri keskenään kohtisuorassa suunnassa. Itse asiassa tämä ei ole aivan korrekti: jos satelliitin suuntakulma on A , voidaan η tulkita tasokoordinaatiksi

3 Kantoaaltovaihemittaukset ja paikkatietosovellukset

suuntaan $A+90^\circ$, mutta χ -akseli sukeltaa maahan kulmalla ζ , satelliitin zeniittikulma. Maan pinnalla tarvitaan koordinaatti $\omega = \chi/\cos\zeta$ suuntaan A . Silloin pseudoetäisyyden virhe ratavirheen seurauksena on

$$\Delta P - \Delta P_0 = -\frac{1}{\rho_0}\eta\Delta y - \frac{\cos\zeta}{\rho_0}\omega\Delta z,$$

jossa ω on tasokoordinaattiero tukiaseman kanssa satelliitin suuntaan, ja η tasokoordinaattiero sen kanssa kohtisuoraan suuntaan. Δy on satelliitin paikkavirhe "vasen-oikea" suunnassa, Δz "ylöspäin" taivaan kannella.

Koska yo. kaava on bilineaarinen koordinaateissa (η, ω) ja siis myös yleisemmin karttakoordinaateissa, voidaan korjaus *interpoloida* lineaarisesti, kun se on kolmella tukiasemalla määritetty. Jos oletetaan tukiasemat A, B ja C , ja mitatut korjaukset $\Delta P_A, \Delta P_B$ ja ΔP_C , voidaan laskea mielivaltaisen pisteen korjaus seuraavasti:

$$\Delta P = p^A\Delta P_A + p^B\Delta P_B + p^C\Delta P_C, \quad (3.6)$$

jossa p^A, p^B ja p^C ovat laskentapisteen *barysentriset koordinaatit* kolmion sisällä:

$$p^A = \frac{\begin{vmatrix} x_B & x_C & x \\ y_B & y_C & y \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} x_A & x_B & x_C \\ y_A & y_B & y_C \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}}, p^B = \frac{\begin{vmatrix} x_C & x_A & x \\ y_C & y_A & y \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} x_A & x_B & x_C \\ y_A & y_B & y_C \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}}, p^C = \frac{\begin{vmatrix} x_A & x_B & x \\ y_A & y_B & y \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} x_A & x_B & x_C \\ y_A & y_B & y_C \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}}. \quad (3.7)$$

Tässä on käytetty taso- eli karttakoordinaatit (x, y) , mutta kaavat toimisivat missä tahansa tasokoordinaatistossa, myös (η, ω) .

Barysentrisille koordinaateille pätee $p^A + p^B + p^C = 1$, ja ne ovat kaikki kolme *lineaarisia* sekä x - että y -koordinaatissa. Yksinkertaisella sijoituksella voidaan varmistaa, että nurkkapisteessä esim. pisteessä A , $p^A = 1$ ja $p^B = p^C = 0$ – *reprodusoiva ominaisuus*.

Todellisuudessa kuitenkin pseudoetäisyyskorjaus ei ole tarkasti lineaarinen: pitäisi käyttää kvadraattinen kaava

$$f(X) - f(X_0) = \frac{\partial f}{\partial X} \Big|_{X=X_0} \xi + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial X^2} \Big|_{X=X_0} \xi^2 + \dots$$

Tässä laskettiin jo, että

$$\frac{\partial f}{\partial X} \Big|_{X=X_0} = -\frac{1}{\rho_0} + \frac{(x - X_0)^2}{\rho_0^3}.$$

Voimme sen lisäksi vielä laskea, että

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 f}{\partial X^2} \Big|_{X=X_0} &= -\frac{x - X_0}{\rho_0^3} - 2\frac{x - X_0}{\rho_0^3} + 3\frac{(x - X_0)^3}{\rho_0^5} = \\ &= 3\left(\frac{(x - X_0)^3}{\rho_0^5} - \frac{x - X_0}{\rho_0^3}\right). \end{aligned}$$

Taas

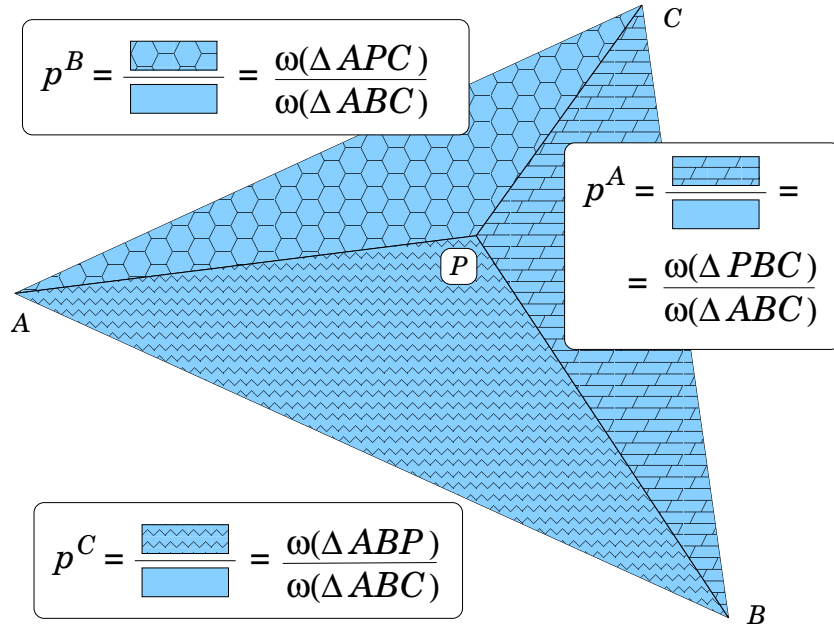
$$\begin{aligned} x - X_0 &= -\rho_0, \\ y - Y_0 &= 0, \\ z - Z_0 &= 0, \end{aligned}$$

ja

$$\frac{\partial^2 f}{\partial X^2} \Big|_{X=X_0} = 0, \quad \frac{\partial^2 f}{\partial Y^2} \Big|_{Y=Y_0} = 0, \quad \frac{\partial^2 f}{\partial Z^2} \Big|_{Z=Z_0} = 0.$$

Tämä on yllättävä tulos, muttei aivan yllättävä. Kaavan 3.5 on voimassa kolmiulotteisessa avaruudessa, eli kun paikkaerovektori tukiaseman ja roverin välillä on $\mathbf{s} = \xi\mathbf{e}_1 + \eta\mathbf{e}_2 + \chi\mathbf{e}_3$; kaavassa esiintyy vain η ja χ , mutta se ei ole kaavan vika.

Kuitenkin interpolointi kolmen tukiaseman välillä *olisi tehtävä kolmiulotteisessa avaruudessa, ottaen huomioon Maan pinnan kaarevuutta*. Yksinkertaiset tasokaavat kuten 3.6 eivät riitä. Kuitenkin (η, χ) -tasossa kaavat kelpaavat.



Kuva 3.2: Barysentriset koordinaatit

3.4.3 Yhteenveto

Menetelmä on siis seuraava:

1. Jokaiselle satelliitille erikseen, laske tukiasemien A, B, C ja roverin erikoiskoordinaatit η, χ roverin läpi kulkevassa tasossa, joka on kohtisuora satelliitin suuntavektoriin (edellyttää almanakkatiedon käyttö)³
2. Laske niistä barysentriset painot (kaava 3.7) sijoittamalla (η, χ) (x, y) :n sijaan , ja
3. Suorita ΔP -arvojen interpolaatio.

Selvyyden vuoksi annamme vielä piirros.

3.4.4 Ilmakehän mallinnus

Satelliittien rata- ja kellovirheiden vaikutus on luonteeltaan *funktionaalinen*, eli se voidaan periaatteessa tarkasti laskea liikkuvan vastaanottimen paikkaan, jos on annettuna kolmen tukiaseman havaintoja eli pseudoetäisyyskorjauksia, ja tukiasemat ovat kauniissa kolmiossa mittaustapaikan ympärillä. Ilmakehän vaikutus taas ei ole funktionaalinen vain *stokastinen*.

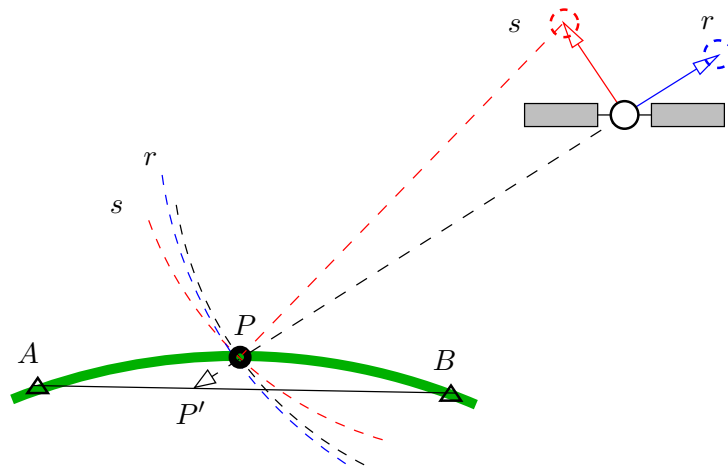
Siksi tarkka ennustaminen roverin paikkaan ei onnistu; epätarkkuus kasvaa kun etäisyys tukiasemilta kasvaa.

Se, millä tavalla se kasvaa, riippuu ilmakehän tilastollisista ominaisuuksista. Ilmakehän – sekä ionosfäärin että tropisfäärin – aiheuttama viive GPS-signaaliin (siinä tapauksessa, että satelliitti on zeniitissa) muodostaa *stokastinen prosessi*, vaikkapa $d(\varphi, \lambda)$, maantieteellisen paikan (φ, λ) domeenilla. Siihen voidaan määrittää *signaalikovarianssifunktio*. Esim. kahden paikan välistä kovarianssia voidaan kuvata Gauss-Markov -tyyppisellä kovarianssikaavalla:

$$\text{Cov}(d(\varphi_1, \lambda_1), d(\varphi_2, \lambda_2)) = C_0 e^{-\|\psi\|/\psi_0},$$

jossa ψ on pisteiden (φ_1, λ_1) ja (φ_2, λ_2) välinen kulmaetäisyys Maan pinnalla. Suure C_0 kutsutaan *signaalivarianssiksi*, suure ψ_0 *korrelaatiopituudeksi*. Suureet voidaan valita sopiviksi eli realistisiksi tietyn ajan ja paikan tropo- tai ionosfääriin.

³Siis: projisoidaan tukiaseman koordinaattivektori roverin kanssa e'_2, e'_3 -tasoon. Eli, laske $\eta_A = \langle (\mathbf{r}_A - \mathbf{r}) \cdot \mathbf{e}'_2 \rangle$, $\chi_A = \langle (\mathbf{r}_A - \mathbf{r}) \cdot \mathbf{e}'_3 \rangle$, ja samoin tukiasemille B ja C .



Kuva 3.3: Differentiaali-GPS geometria. Radiaalinen satelliitin ratavirhe (r) ei vaikuta vahvasti eri maa-asemien väliin erotushavaintoihin, sivuttainen ratavirhe (s) sen sijaan vaikuttaa lineaarisesti asemien välisen etäisyyden suhteen. Kuvattu myös differentiaalikorjauksen laskentatapa: liikkuvan maa-aseman paikka arvuudessa P on projisoitava tukiasemien läpi menevään tasoon AB (projektiopiste P') ja sen jälkeen korjaus lineaarisesti interpoloitava.

Toinen lähestymistapa on mallintaa ilmakehä funktionaalisesti, mutta tuntemattomilla parametreilla. Esim. globaalista ionosfääriä voidaan hyvin kuvata pallofunktiokehittelmänä⁴. Myös polynomi- tai Fourier-kehitelmä tulee kysymykseen. Tuntemattomat parametrit estimoidaan tukiasemien havainnoista.

Tämän hetken “state of the art” on, että tukiasemaverkon avulla tapahtuva RTK-paikannus on yhtä tarkka kuin yhden tukiaseman avulla tapahtuva RTK-paikannus tukiaseman välittömässä läheisyydessä, *edellyttäen*, että tukiasemien väliset etäisyydet ovat korkeintaan n. 80 km. Paikannuksen laatu säilyy myös jonkin matkaa tukiasemaverkon peittoalueen ulkopuolelle. Ilmakehä on rajoittava tekijä.

3.4.5 Tekninen toteutus

3.4.5.1 “Virtuaalitutiasema”

Tässä ratkaisussa (VRS, Virtual Reference Station) generoidaan tukiasema, joka on lähellä roverin paikkaa⁵. Ratkaisu vaatii, että rover lähettää omaa likimääräistä paikkaan tutkiasemaverkon palvelimelle. Yhteys palvelimeen on oltava yksi-yhteen: “singlecasting”. Broadcasting-ratkaisu ei kelpaa, koska korjaukset ovat jokaiselle käyttäjälle sidottu eri paikkaan eli ovat erilaisia. Suomen (GeoTrimin) VRS-ratkaisu käyttää mobiili-internetia matkapuhelinverkon kautta. Tässä ratkaisussa maksetaan vain siirretystä datasta, yhteys on koko ajan päällä.

Formaatti, jolla lähetetään korjaustiedot roverille, on RTCM-104 mukainen. Näin ollen vastaanotin, joka on suunniteltu käytettäväksi yhden tukiaseman kanssa, toimii myös tämän virtuaalitutiaseman kanssa.

3.4.5.2 Verkkolaskenta palvelimella

Tässä ratkaisussa lähetetään roverin mittaukset palvelimeen, jossa se käsitellään yhdessä tukiasemaverkon mittausten kanssa. Laskentakapasiteetti voi tässä asettaa rajoituksia klienttien määrän suhteen.

Etuna virtuaalitutiasema-konseptin verrattuna on, että käsittelyssä voidaan käyttää “temppejuja”: esim. RTCM-klienttiohjelmisto olettaa, että, jos etäisyys roverin ja tukiaseman välillä on pieni,

⁴Itse asiassa GPS-navigaatioviesti sisältää sellaisen mallin kahdeksalla parametrilla.

⁵Siis: generoidaan saman näköistä havaintodataa, jota saataisiin, jos virtuaaliaseman paikalla olisi oikea tukiasema.

voidaan ilmakehän vaikutus jättää huomioimatta. Jos tukiasema on virtuaalinen, voi tämä olla väärä olettaus.

3.4.5.3 Verkkolaskenta klientilla

Tässä ratkaisussa tukiasemaverkon mittaukset lähetetään raakana klientille eli roverille. Tämä vaatii aikamoista kaistaleveyttä – koska on kyse monen aseman datasta – ja laskentakapasiteettia. Toisaalta tämä skaalautuu paremmin klienttien määrää kasvatessa.

3.5 Käytännön toteutukset

3.5.1 Geotrimin VRS-RTK ratkaisu

Vuonna 2003 syntyi Maanmittauslaitoksen ja Geotrim Oy:n välillä sopimus verkko-RTK-järjestelmän rakentamiseksi Suomen alueelle. Tällä hetkellä verkko (GPSNet.fi) koostuu yli 80 asemasta, joiden väliset etäisyydet ovat luokkaa 50–80 km.

Mittaukset tehdään kerran sekunnissa; siksi järjestelmä tukee myös liikkuvien vastaanottimien (kulkuneuvojen) paikannusta, esim. ilmakehän lentokoneet. Data tulee GSM-datapuhelun muodossa RTCM-formaatissa laskettuna virtuaalitulokseksi, joka on käyttäjän lähellä.

Yht'aikaisten käyttäjien määrä voi olla Maanmittauslaitoksen kenttäkauden aikana useita kymmeniä. Palvelulla on myös MML:n ulkopuolisia tilaajia, esim. kuntia. Verkon palvelimet sijaitsevat Geotrimin Vantaan toimitiloissa. Se on puolen tusinan tehokkaan PC:n klusteri.

Myös tukiasemaverkon staattiset mittaukset arkistoidaan jonkin aikaa.

3.5.2 GL:n kokeet

GL:n kokeissa [4] on todettu, että sekä Geotrimin verkossa että Tampereen kaupungin alueen omassa VRS-tukiverkossa saavutettiin tulokset, jotka olivat käytännössä melkein yhtä hyviä kuin yhden tukiaseman perinteisiä RTK-mittauksia. 95% tapauksista virhe alitti 5 cm. Alustusajat ("on-the-fly ambiguity resolution") kesti yleensä luokkaa puoli minuuttia.

Asemien väliset etäisyydet vaikuttavat sekä saavutettavaan tarkkuuteen että alustusajoihin. Vaikutus näkyy ensimmäisenä korkeusratkaisussa, jos tukiasemavälit kasvavat yli 100 km. Tämä johtopäätös perustuu rauhallisen ionosfäärin aikaisiin mittauksiin.

VRS-järjestelmän hyvä suoritus riippuu kriittisesti käytetystä verkko-ohjelmistosta, etenkin sen ilmakehän (ionosfäärin ja troposfäärin) oikeasta mallinnuksesta.

Raportin loppukaneetti on muistamisen arvoinen:

“Lopuksi korostetaan vielä mittajaan vastuuta. VRS vaatii käyttäjältään samanlaista perehtyneisyyttä ja kokemusta kuin perinteisetkin mittausten menetelmät.”

3.5.3 Muut käyttökokemukset

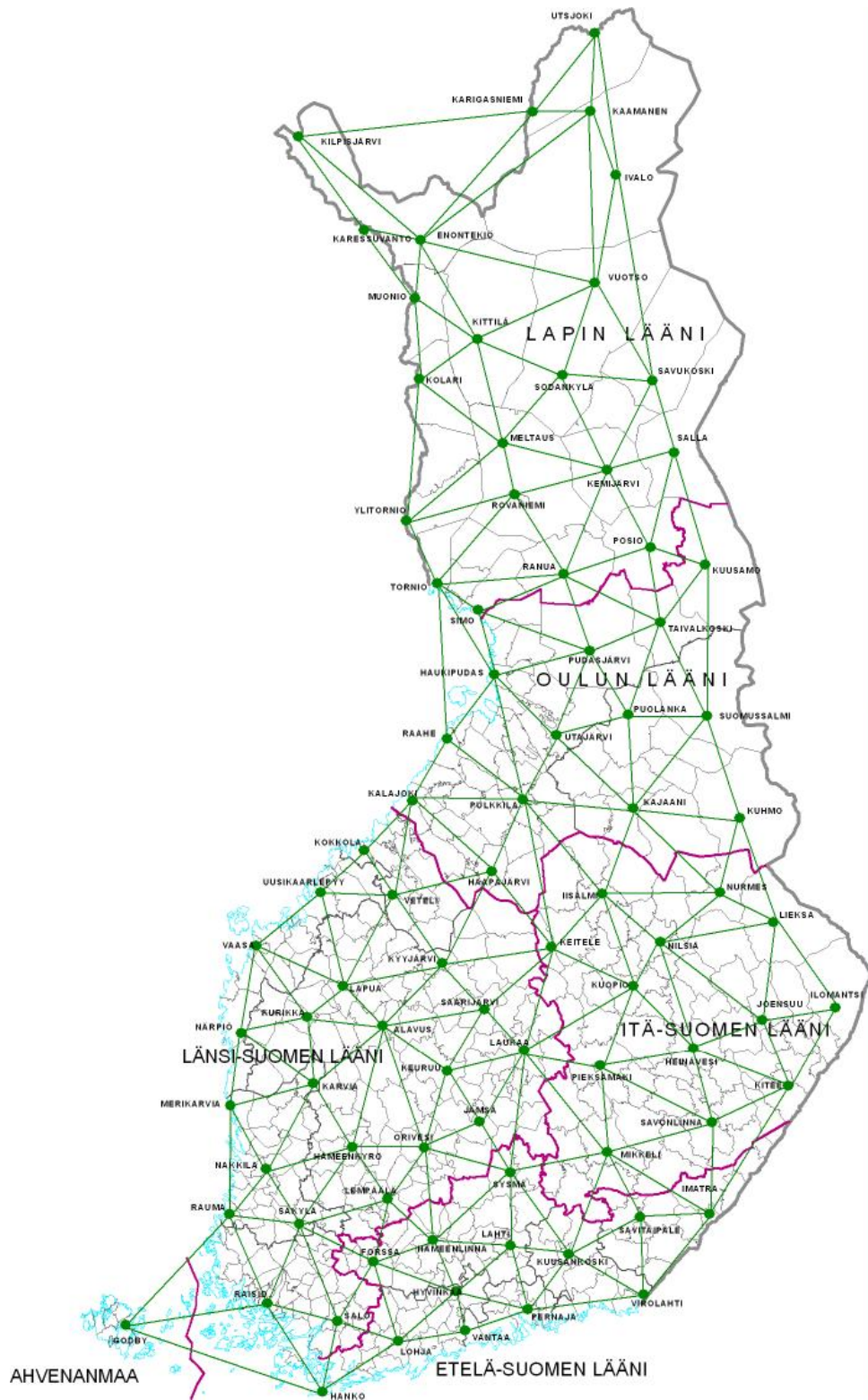
Verkko-RTK-järjestelmät ovat käytössä tällä hetkellä monissa maissa. Saksassa käytetään SAPOS-järjestelmä <http://www.sapos.de/>.

On olemassa, myös Suomessa, kaupungit joilla on oma RTK-tukiasema kaupungin keskustassa. Silloin tarkkuus ei ole homogeeninen: kaupungin keskialueella, 10–20 km matkan sisällä, tarkkuus on hyvä, sen ulkopuolella se huononee. Tämä ei ole välttämättä huono asia, koska arvokas, 1. mittaussuoran, maa on kaupungin keskialueella.

3.5.4 Lisäksi...

- Eri ambiguuteettiratkaisumenetelmien yksityiskohdat

3 Kanta-aaltovaihemittaukset ja paikkatietosovellukset



Kuva 3.4: GPSNet verkko. Kuva ©Trimble Terrasat GmbH

4 Koodihavainnot ja paikkatietosovellukset

4.1 Yleistä

Differentiaali-GPS mittaukset "koodien", eli kantoaallolle moduloitujen pseudosatunnaiskoodien (PRN) avulla on erittäin laajasti käytössä oleva paikkatiedon mittaustoiminta. Sovellukset voidaan jakaa tarkkuusluokituksen mukaan seuraaviin kategorioihin (tarkimmasta vähemmän tarkkaan):

- Tiedonkeruu
- Paikkatietojen ylläpito
- Mobiilit paikkatietojärjestelmät ("Mobiili GIS")
- Pakannetut palvelut ("Location Based services", LBS)

4.1.1 Paikkatiedon keruu

Tämä on alkuperäisten tietojen keruu maastossa. Tähän kuuluu aina paikannus, mutta myös mitattujen kohteiden kuvaus tietyn järjestelmän (standardin) mukaan.

Paikkatietojen keruuta eli *kartoitusta* voidaan hyvin suorittaa off-line, eli data kerätään talteen kenttälaitteelle ja viedään myöhemmin paikkatietokantaan.

Tarkkuusvaatimukset ovat tässä suurimmat, 0.2–10 m. Koodihavaintojen avulla ei pääse alle 0.2 m, usein pienempikin tarkkuus riittää.

4.1.2 Paikkatiedon ylläpito

Tässä päivitetään jo olemassa oleva paikkatieto maastossa. Tätä varten olemassa oleva data (alueen aineisto) ladataan mobiililaitteeseen (GPS-laite tai siihen kytketty kenttätietokone tai datakeräyssikkö), joko etukäteen (off-line) tai työskentelyn aikana langattomasti (on-line).

Paikannus on tässä moodissa apuvälineenä kohteiden löytämiseen. Tarkkuus ei ole enää kriittinen, ellei mitätä myös uusia kohteita.

4.1.3 Mobiilit paikkatietojärjestelmät

Tässä käyttömoodissa paikkatietoja käyttävä organisaatio mahdollistaa paikkatietokantansa käyttöä ja päivitystä suoraan maastosta käsin (on-line). Päätelaitteena kannettava kenttäkone jossa yleiskäyttöinen käyttöjärjestelmä (usein Windows CE/Mobile/Pocket PC, harvemmin MS-DOS). Usein käyttäjän laatimat klienttiohjelmistot.

4.1.4 Paikannetut palvelut

Loppukäyttäjälle eli kuluttajalle suunnatut mobiilit paikkatietopalvelut. Päätelaitteena on ajateltu laajasti käytössä oleva kuluttajatasen laite eli älykäs mobiilipuhelin.

Klassinen esimerkki on "missä on lähin pizzeria?". Eivät vielä kuitenkaan saavuttanut merkittävää suosiota.

Tekniset ratkaisut DGPS:n lisäksi myös mobiiliverkon eri paikannusratkaisut ("Assisted GPS", AGPS).

Sisätiloissa erilaiset ratkaisumallit: mikromekaaniset liikeanturit (MEMS) käytettynä inertianavigoinnin tavoin; WLAN-avusteinen paikannus, jne. Nopeassa kehityksessä oleva kenttä. Yleisten, avoimien standardien luominen avainasemassa.

4.1.5 RTCM-standardi

Jo mainittu RTCM-standardi tukee myös (ja ensisijaisesti) DGPS-paikannus:

Message Type	Message Title
1	DGPS corrections
2	Delta DGPS corrections
3	Reference station parameters
9	High rate DGPS corrections
10	P code DGPS corrections
11	C/A code L1/L2 delta corrections

Tässä taulukossa on mainittu vain suoraan DGPS:ään liittyvät viestityypit. Kuten näkyy, jakeluaan korjausten lisäksi myös "delta-korjaukset"; sen vuoksi, että lähetetyt korjaukset ovat aina vanhoja. Eli, aikahetki – epookki – joihin ne viittaavat ja ovat tarkasti voimassa, on aina menneisyydessä: korjausten laskentaan tukiasemassa, niiden pakkaamiseen RTCM-standardin mukaisesti, niiden lähettämiseen, vastaanottamiseen ja käyttöön kuluu aikaa.

Delta-korjaus kertoo, mitä on korjauksen aikaderivaatta. Sen avulla – olettaen, että korjaus käytäytyy lineaarisesti – voidaan laskea, mikä oikea korjaus on käyttöhetkellä.

Puhutaan pseudorangesta (PR), pseudorange correction (PRC) ja range-rate correction (RRC) joka on siis sama kuin "delta". Kaava on

$$PRC(t) = PRC(t_0) + RRC(t_0) \cdot (t - t_0).$$

Aikaero $t - t_0$ voi hyvinkin olla kymmeniä sekunteja.

4.1.6 Tarkkuus

DGPS:n tarkkuus on pienellä alueella huomattavasti parempaa kuin suora GPS-mittaus ilman tukiaseman käyttöä.

Kuten myös kantoaaltovaihemittauksen tapauksessa, tärkeimmät virhelähteet ovat:

- Rata-elementit
- Satelliittien kellovirhe
- Ionosfääri
- Troposfääri
- Monitieheijastukset
- Laitteen koodimittauksen epätarkkuus.

Virhelähde	Luonne	Suuruus	Suuruus diff. mittauksessa	Eliminointi
Satelliittirata	Geometrinen	~1 m	~4 mm/100 km	Ei eliminoida
Sat. kellovirhe	Vakio	metrejä	0	Diff. erotukset
Ionosfääri	Stok. prosessi	±10 m	~1 cm/100 km	Kaksi taajuutta L_1, L_2
Troposfääri	Stok. prosessi	±10 cm	1 cm/100 km	Diff. erotukset
Monitie	Paikallinen	~1 m	sama	?
Laitteen epätarkkuus	Paikallinen	0.2 - 2 m	sama	Teknologia

Alle enemmän yksityiskohtia:

4.1.7 Satelliittien ratavirhe

Satelliittien itse lähettämät ratatiedot (broadcast ephemeris) mahdollistaa niiden paikan laskeminen avaruudessa nykyisin noin ± 1 m tarkkuudella.

Absoluuttisessa paikannuksessa tämä ratavihe menee suoraan laskettuun paikkaan. Differentiaalipaikannuksessa eli tukiasemaa käyttäessä eliminoiduu tästä virheestä suurin osa. Tukiasema määrittää ratavirheistä aiheutuvat pseudoetäisyysvirheet ja lähettää ne liikkuvalla käyttäjällä. Jos liikkuva käyttäjä on lähellä tukiasemaa, on hänen pseudoetäisyyden virhe sama kuin tukiaseman; kun etäisyys tukiasemasta kasvaa, kasvaa myös kahden pseudoetäisyyden välinen erotus, joka menee kokonaan liikkuvan vastaanottimen paikkaan paikannusvirheena.

Käytännössä tyypillisimmissä DGPS-sovelluksissa ei ole tarpeen käyttää tarkkoja ratatietoja (precise ephemeris).

4.1.8 Satelliittien kellovirhe

Tämä eliminoiduu kahden vastaanottimen välisessä erotuksessa, eli differentiaalipaikannuksessa se eliminoiduu täysin.

4.1.9 Ionosfääri, troposfääri

Ionosfäärin vaikutus eliminoidaan täysin käyttämällä kaksitaajuusvastaanotin. Jos sellainen ei ole (halvempi), käytetään ionosfäärin *mallinta*. Virhe kasvaa etäisyyden mukaan tukiasemasta. RTCM-standardi mahdollistaa ionosfäärikorjausten jakelua (viestityyppi 15).

Troposfäärin vaikutus on sama molemmalla taajuudella, siis *ei-dispersiivinen*, toisin kuin ionosfäärin vaikutus. Se eliminoiduu likimäärin differentiaalimittauksesta, jos etäisyys tukiasemasta on pieni.

4.1.10 Monitie

Monitie on hankalasti eliminoitava häiriötekijä. Koodimittauksessa se voi olla huomattavaa, metrien luokkaa.

Hyvä käytännön neuvo on välttää heijastavien metallipintojen läheisyyttä (esim. auton katto).

4.1.11 Laitteen kohinataso

Laitteet ovat erilaisia, ja niin ovat antennitkin.

4.1.12 SBAS-järjestelmät

Niistä lisää myöhemmin. Ne ovat koodimittausten korjausten jakelukanava joka käyttää geostationaarisia satelliitteja.

4.1.13 Omnistar

Tämä on kaupallinen satelliittikorjaustietopalvelu: www.omnistar.com. Se jakelee differentiaalikorjauksia maailmanlaajuisesti. Korjaukset lasketaan käyttämällä suurehko määrä vertausasemia kaikkialla maailmassa. Tarkkuus alle metri melkein kaikkialla maa-alueilla. Myös korkeamman tarkkuuden palvelutaso on tarjolla.

4.1.14 Merenkululaitoksen palvelu

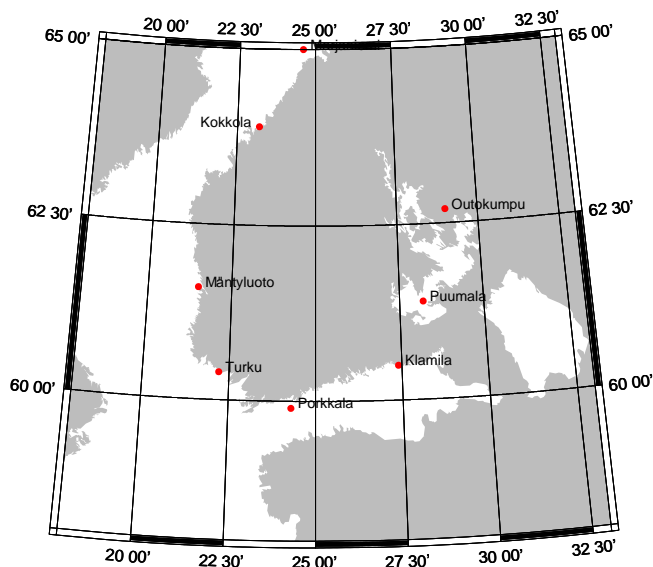
Tämä palvelu, joka on tarkoitettu käytettäväksi sekä itäisellä Itämerellä että sisäisillä järviolueilla, käyttää pitkäaaltoaaltoradiota (taajuudet 287.5 - 314.5 kHz) korjausten jakelukanavaksi. Suomen asemat ovat Porkkala, Mäntyluoto, Puumala, Outokumpu, Turku, Marjaniemi, Klamila ja Kokkola. Maksuton julkinen palvelu.

4.1.15 Fokus-palvelu

Tämä on Digita Oy:n operoima palvelu Suomen alueella, jonka jakelukanava on Radio Suomen ULA-radiolähetysten sivukaista: RDS, Radio Data System, jota myös käytetään asemien identifiointiin ja automaattiseen taajuudenvaihtoon jne. Palvelun käyttämiseen tarvitaan GPS-laitteen lisäksi dekooderi (korjausten vastaanotin) ja voimassa oleva tilaus.

4 Koodihavainnot ja paikkatietosovellukset

Asema	Taajuus	Peittoalue
Porkkala	293.5	250 km
Mäntyluoto	287.5	250 km
Puumala	290.0	70 km
Outokumpu	304.5	70 km
Turku	301.5	200 km
Marjaniemi	314.5	250 km
Klamila	287.0	250 km
Kokkola	290.5	250 km



4.2 Mittausmenetelmät ja geometriat

Koodipohjainen DGPS-paikannus on tarkkuudeltaan niin vaatimaton, että verrattuna kantoaaltovaihemittaukseen ei kannata yhdistää mittauksia eri tukiasemilta. Jos on käytävissä tukiasemien verkko, käytetään vain lähimmän aseman tarjoama korjaus. Myös kahden taajuuden vastaanottimia ei kannata käyttää.

4.3 Käytännön toteutukset

4.3.1 GIS-sovellukset

GIS-sovellukset perustuvat pääsääntöisesti koodihavaintoihin, koska

- tarkkuus riittää
- ambiguiteettongelma vaihemittauksissa
- vaatii riittävästi satelliitteja, ja jatkuvaa näkyvyyttä, ei "huonoihin" paikkoihin.

Kuitenkin:

- Karttoitus ja merkintä (esim. johtokarttoitus, lähtöpisteistö ...)
- Maastomittaustoimitukset (MML käyttää jo)
- Maastotukimittaus fotogrammetriassa, kuvauskoneen paikannus
- jne...

5 Uutta teknologiaa: GNSS-järjestelmät

	GPS	GLONASS	Galileo
Ratatasoja; välinen kulma	6; 60°	3; 120°	3; 120°
Satelliitteja / taso; välinen kulma	4; 90°	8; 45°	9; 40°
Satelliitteja yhd. (virall.)	24+4	21+3	27+3
Radan korkeus (km)	20 000	19 100	23 222
Periodi	11 ^h 58 ^m	11 ^h 15 ^m	14 ^h 05 ^m
“Resonanssi” (kierroksia /tähtivuorokausia)	2/1	17/8	17/10
Inkлинаatio	55°	64°.8	56°

5.1 GPS-modernisointi

Vastaava: GPS Joint Program Office <http://gps.losangeles.af.mil/jpo/>.

5.1.1 Satelliittityypit

Eri GPS-satelliittityypit nimetään *blokeiksi*.

Block I koostui koesatelliiteistä, joilla kokeiltiin GPS-konseptin toimivuutta.

Block II oli ensimmäinen operationaalinen GPS-satelliittityyppi. Niitä on edelleen toimimassa.

Block IIA: A = “Advanced”. Edelleen toimimassa.

Block IIR: Ensimmäinen laukaistiin v. 1997.

Block IIF: Ensimmäistä oli määrä laukaista 2009, mutta viivästyi.

Block III: Suunnitteilla vuodeksi 2012.

5.1.2 Uudet koodit

Ensimmäinen Block IIR-M satelliitti laukaistiin syyskuun 25. päivänä 2005. Se lähettää uusi siviilikoodi L2C, moduloituna L_2 -kantoaallon päälle. Se sisältää uusia pseudosatunnaiskoodeja, ns. CM (Civilian Moderate) ja CL (Civilian Long) koodit, joiden pituus on 10 230 ja 767 250 bittiä. Yhdessä modulaatiotaajuus (“chip rate”) on 1 023 000 bittiä sekunnissa. L2C sisältää myös parannetun navigaatiaviestin, johon kuuluu mm. GPS-järjestelmän aikaskaalan offset (tärkeä yhteiskäytössä GLONASSin ja Galileon kanssa!) sekä Alert-varoitus, joka kuuden sekunnin sisällä ilmoittaa, jos satelliitin dataan ei ole luottamista (*integriteetti*).

5.1.3 Uudet taajuudet

Uusi taajuus L5, 1176.45 MHz, on tarkoitettu Safety-of-Life -tyyppisille käytölle etenkin ilmailussa. Tämän taajuus on kansainvälisesti suojattu ilmailun käyttöön. Block IIF-satelliitit kantavat tämä taajuus ensimmäisinä; ensimmäinen laukaus suunnitteilla vuoteen 2008.

Myös SBAS-järjestelmät käyttävät L5.

5.2 GLONASS

5.2.1 Toimijat

Ks. Information-Analytical Center <http://www.glonass-ianc.rsa.ru/>, paina “eng”-lippu.

Status: <http://www.glonass-ianc.rsa.ru/pls/htmldb/f?p=202:3:9769907275096071228::NO:::>

Lokakuussa 2009 oli 19 satelliittia radassaan, joista 16 oli käyttökelpoisia ja 3 huollon alaisina. Satelliittien määrä on kasvanut hitaasti.

5.2.2 Systeemin kuvaus

GLONASS-järjestelmää kuvaa Interface Control Document ICD (50 sivua) vuodesta 2002.

GLONASS -systeemi eroaa GPS:sta ja Galileoilta siinä, että *jokaisella satelliitilla on oma kanta-aaltotaajuus*. Kuitenkin, kuten GPS, se käyttää kaksi taajuuskaistaa L_1 , n. 1.6 GHz, ja L_2 , n. 1.2 GHz. Nykyisin kuitenkin "antipoodit" – samassa ratatasossa vastakkain olevat satelliitit – voivat käyttää samoja taajuuksia. Taajuudet ovat:

$$\begin{aligned} f_{K1} &= f_{01} + K\Delta f_1, \\ f_{K2} &= f_{02} + K\Delta f_2, \end{aligned}$$

jossa K on satelliitin kanavanumero – löytyy almanakalta – ja

$$\begin{aligned} f_{01} &= 1602 \text{ MHz} & \Delta f_1 &= 562.5 \text{ kHz}, \\ f_{02} &= 1246 \text{ MHz} & \Delta f_2 &= 437.5 \text{ kHz}. \end{aligned}$$

Siviilikoodilla – C/A:ta vastaava – on bittitaajuus 0.511 MHz, salatulla sotilaskoodilla 5.11 MHz. Modulaatiotekniikka on sama kuin GPS, eli vaihemodulaatio vaihesiirtymällä $\pi = 180^\circ$. Navigointiviesti löytyy vain L_1 :lla; sen bittitaajuus on 50 Hz.

Satelliittien säteily on myötäpäivään ("right-hand") sirkulaarisesti polarisoitu, kuten GPS.

GLONASS-aikaskaala: on sama kuin UTC(SU), siis UTC:n Venäjän Federaation kansallinen toteutuma. Tämä merkitsee, että UTC:n karkaussekunnit, jotka tapahtuvat joko Joulukuun tai Kesäkuun lopussa, kulkeutuvat GLONASS-aikaskaalaan. Tämä on *erilainen* kuin GPS-käytäntö: GPS-ajassa ei tapahdu karkauksia.

Erotukset UTC:n ja UTC(SU) välillä sekä ilmoitus tulevasta karkaussekunnista sisältyvät navigaatioviestiin.

Vertausjärjestelmä: käytetään järjestelmä PZ90, joka on geosentrinen mutta eroaa hieman GRS80:sta. Efemeriidit ilmoittavat satelliitin paikka avaruudessa tässä järjestelmässä, kuitenkin suorakulmaisena.

Radat: GLONASS-satelliittien nimellinen määrä (täydessä konstellaatiossa) tulee olemaan 21 kpl kolmessa ratatasossa, plus kolme varasatelliittia. Inklinaatiokulma ekvaattoriin nähden on $64^\circ.8$, korkea arvo joka palvelee vanhan Neuvostoliiton aluetta paremmin. Kuten GPS:lläkin, myös GLONASSin satelliittien geometria toistuu tähtivuorokauden jälkeen. Toisin kuin GPS:llä kuitenkin silloin on *samassa* paikassa *toinen* satelliitti. Radan korkeus on 19 100 km ja periodi 11^h15^m , lyhyempi kuin tähtivuorokausi. Vasta kahdeksan vuorokauden (17 kierroksen) jälkeen sama geometria toistuu myös satelliittien identiteettien kohdalta. Ratkaisu vähentää resonantteja ratahäiriöitä, jotka GPS-järjestelmän tapauksessa kuluttavat paljon rakettipolttoainetta.

5.3 Galileo

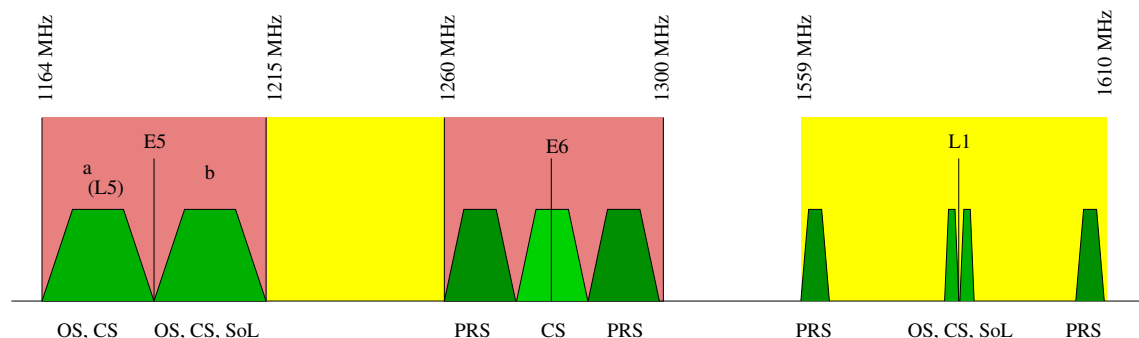
5.3.1 Toimijat

Galileo-järjestelmä on EU-komission ja ESAn yhteinen hanke. He muodostivat "Galileo Joint Undertaking" (GJI), joka taas valitsee "concessionaire:n", yksityisyritys "Galileo Operating Company" joka vastaa Galileon päivittäisistä operaatioista, etenkin sen kaupallistamisesta.

5 Uutta teknologiaa: GNSS-järjestelmät

Keltainen: jo käytössä olevat taajuudet

Punainen: uudet taajuusvaraukset



Kuva 5.1: Galileon taajuudet

5.3.2 Satelliitit ja radat

Galileo-satelliittejä tulee olemaan 30 kpl, kolmessa ratatasossa, jokaisessa yhdeksän satelliittiä ja yksi varasatelliitti. Satelliittien välimatka ratatasossa on 40° . Ratojen kaltevuuskulma ekvaatoriin nähden (*inklinaatio*) on 56° .

Galileo-satelliittien ratojen korkeus on 23 222 km, GPS-ratoja korkeampaa.

Geometria toistuu joka tähtivuorokaudessa, kuten myös GPS-geometria; ero kuitenkin on, kuten myös GLONASSIN tapauksessa, että vuorokauden jälkeen ovat *samassa* paikassa *eri* satelliitit.

Vasta 10 päivän, eli 17 rata kierroksen, jälkeen, ovat taas samat satelliitit samoissa paikoissa havaintopaikan taivaalla.

Ensimmäinen Galileo-satelliitti oli GIOVE-A joka laukaistiin joulukuun 28. päivänä 2005. GIOVE-B laukaistiin huhtikuun 27. päivänä 2008. Molemmat ovat kokeellisia.

5.3.3 Systeemin kuvaus, komponentit

Galileo-järjestelmä on osittain yhteensopiva GPS-järjestelmän kanssa. Se on myös tarkoitettu toimimaan saumattomasti yhteen SBAS-järjestelmien kanssa, kuten (Euroopassa) EGNOS.

Galileon signaali- ja taajuusrakenne on monimutkainen, ks. http://www.esa.int/esaNA/SEM86CSMD6E_galileo_0.html. Kantoaalto on L_1 , 1575.42 MHz kuten GPS:lläkin; E5a (1176.45 MHz) ja E5b (1207.14 MHz); ja E6. E5a kutsutaan myös L5:ksi.

5.3.4 Eri palvelut

Galileon tarjomat *palvelut* jakautuvat seuraavasti:

- Open service (OS). Kaikkien käytettävissä. [L1, E5]
- Safety-of-Life (SOL). [L1, E5b]
- Commercial (CS). [L1, E5, E6]
- Public Regulated Services (PRS). Viimeinen sisältää mm. poliisi, rajavartiolaitos, puolustuslaitos ja myös rauhanturvaajat. Se, että Galileoa kutsutaan "toisin kuin GPS, siviilijärjestelmäksi", ei liene aivan pitävän paikkaansa ... [L1, E6]

Galileossa uusi on *integrity* -palvelu. Se on osaa Safety-of-Life -palvelua.

5.4 Kiinalainen Beidou -järjestelmä

Nimestä: BeiDou on Otava-tähdistö (Ursa Major) jota käytetään Pohjantähden (Polaris, α UMi) löytämiseksi. Näin nimi on navigaation vertauskuva.

5.4.1 Beidou 1

Tämä järjestelmä on varhaisessa rakentamisvaiheessa. Beidou-1 järjestelmä on jo käytössä. Se koostuu tällä hetkellä kolmesta satelliitista geostationarisella radalla. Alunperin uskottiin, että se toimii SBAS-järjestelmän tavalla; kuitenkin saatiin selville, että se toimii myös itsenäisesti: maa-asema lähettää signaali kahden satelliitin kautta liikkuvalla vastaanottimelle, joka vastaa myös satelliittien kautta (se on siis *aktiivinen* järjestelmä). Näin voidaan laskea vastaanottimen paikka, ainakin Kiinan alueella. Maastomallin käyttö parantaa tarkkuutta (http://www.vectorsite.net/ttgps_2.html). Laskettu paikka lähetetään vastaanottimelle salattuna sotilaalliseen käyttöön.

5.4.2 Beidou 2

Tulevaisuuden Beidou-2 järjestelmään (englanninkielinen nimi "Compass") on luvattu myös ei-salattu siviilisignaali, jonka paikannustarkkuus on ± 10 m. Beidou-2 järjestelmä tulee koostumaan 35 satelliitista, joista 5 geostationarisia.

Huhtikuun 14 päivänä 2007 Kiina laukaisi satelliitti Beidou M-1, ensimmäinen satelliitti joka on GPS-tyyppisessä radassa, korkeus 21500 km, inkliinaatio 55° . Se lähettää neljällä taajuudella: 1589.74 (E1), 1561.1 (E2), 1268.52 (E6) ja 1207.14 (E5b) MHz. Signaali on moduloituna pseudosatunnaiskoodeilla hieman samalla tavalla kuin GPS tai Galileo. Ks. [3].

6 Uutta teknologiaa: SBAS-järjestelmät

6.1 Integriteetti ja Safety-of-Life

Integriteetti on se, että varoitetaan käyttäjää, käytännössä kuuden sekunnin sisällä, jos tietyn GPS-satelliitin paikannussignaali näyttää ylittävän asetettua toleranssiarvoa. Safety-of-Life -sovelluksissa tämä on välttämätöntä. Safety-of-Life tarkoittaa se, että jos systeemi ei toimi oikein, ihmisiä voi kuolla.

Esimerkki on lähestyminen ja laskeutuminen lentokentälle: jos laskeudutaan sumussa GPS-navigoinnin avulla, ja korkeusarvo on pielessä monta metriä ilman varoitusta, tapahtuu onnettomuus. Jos sumussa GPS-paikka on pielessä useita metrejä ja lentäjä saa tästä varoituksen, hän ei laskeudu. Jos taas integriteettijärjestelmän takaama tarkkuus on muutama metri ja ei ole sumu vaan matala pilvipeite, voi lentäjä laskeutua vaikkapa silmämääräisesti 200 jalasta alaspäin.

6.2 WAAS

WAAS (Wide Area Augmentation System) julistettiin operationaaliseksi v. 2003. Järjestelmä monitoroi GPS-järjestelmää, laskien differentiaalikorjaukset käyttäjille, sekä antaen sertifioidua *integriteettitasoa*. Tarkkuus differentiaalikorjausten jälkeen on luokkaa ± 2 m. Toiset lähteet antavat 1–2 m vaakatasossa ja 2–3 m pystysuunnassa palvelualueen sisällä. Ilman WAAS GPS-paikannus olisi vain ± 15 m kun käytetään yhden taajuuden GPS-vastaanotin, lähinnä ionosfäärin takia.

Integriteetti taas mahdollistaa ilmailussa operaatiot, jotka vain GPS:n avulla olisivat liian riskikkäitä. GPS sellaisenaan on ollut jo käytössä RAIM-moodissa (Receiver Autonomous Integrity Monitoring), mutta vain reittilentojen suorissa osissa eikä laskutusvaiheessa. Vaatimuksena on, että korkeintaan *kuuden sekunnin* jälkeen kun GPS-satelliitin signaali menee epäluotettavaksi, käyttäjää informoidaan asiasta. Vuodesta 2007 lähtien WAAS on hyväksytty ohjaamaan lentokoneen laskeutumista turvallisesti 200 jalkaan saakka lentokentän yläpuolella: *ICAO Category I*.

WAAS on myös edullisempi, koska perinteisen radionavigoinnin lentokenttä-alueen tukilaitteistot ovat massiivisia ja kookkaita. Tämän lisäksi se säästää polttoainetta, koska GPS/WAAS:n avulla voidaan lentää suoraan kentältä kentälle eikä monikulmiojonon kautta radiomajakoiden yli.

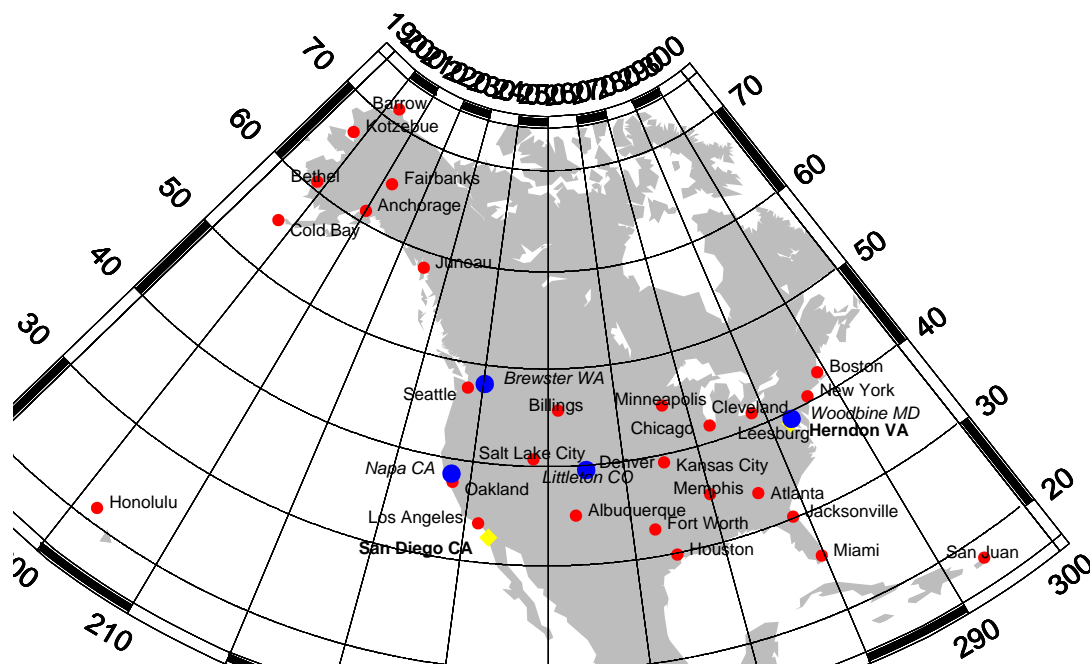
Amerikkalainen WAAS-järjestelmä käyttää 29 tukiasemaa (WRS, Wide-area Reference Stations) Pohjois-Ameriikassa, mukaanlukien kahdeksan Alaskassa, yksi Hawaiiilla ja yksi Puerto Ricolla. Tämä on myös se alue, jonka sisällä annetut korjaukset ovat tarkkoja.

Korjaukset lasketaan kolmella ns. WMS-aseamalla (Wide-area Master Stations). Nämä laskevat differentiaalikorjaukset maata peittävän *hilan* muodossa. Korjausviesti lasketaan ja lahetetaan geostationaariseen satelliittiin, joka edelleen lähettää viesti käyttäjälle myös GPS-satelliitin käytämällä taajuuksilla, eli L_1 ja (uudemmissa satelliiteissa) L_5 .

Tietoliikenneyhteydet asemien välillä ovat varta vasten rakennettuja. Avoin Internet ei ole hyväksyttävällä luotettavuudella tosiaikainen.

Kategoria	“Decision height”	Näkyvyys	Näkyvyys kiitoradalla
Cat I	≥ 200 ft, ja	≥ 800 m, tai	≥ 550 m
Cat II	100 – 200 ft, ja		≥ 350 m
Cat IIIA	< 100 ft/ ei ole; ja		≥ 200 m
Cat III B	< 50 ft / ei ole; ja		50 – 200 m
Cat III C	ei ole		ei rajoituksia

Taulukko 6.1: Eri lähestymiskategoriat ICAO:n mukaan. SBAS-lähestyminen on mahdollista vain osaan kategorioista.



Kuva 6.1: WAASin maasegmentti. Punainen: WRS, keltainen: WMS, sininen: GUS. Järjestelmä laajennetaan lähiaikoina Kanadaan ja Meksikoon.

Satelliitti	Pituusaste	Loppuu	Huom.
Inmarsat IIIs POR	178E	Syys 2007	
Inmarsat AOR-W	142W	Syys 2008	
Telesat Anik F1R	107,3W	2016	Koekäytössä
PanAmSat Galaxy 15	133W	2016	

Taulukko 6.2: WAAS-satelliitit. Nämä ovat yleistietoliikennesatelliitit, joissa WAAS-transponderi on vain pieni osa hyötykuormasta

Geostationaarisen satelliitin signaali on samalla tavalla koodattu käyttäen pseudosatunnaiskoodit kuin GPS-satelliittien signaalit. WAAS-satelliitteilla on omat PRC-koodit jotka eroavat toisistaan ja GPS-satelliittien koodeista, ja vastaanottimen korrelaattori erottaa satelliitit toististaan niiden avulla.

WAAS-kelpoinen GPS-vastaanotin vastaanottaa korjaukset erikseen satelliittien rata- ja kellovirheistä (viimeinen sama kaikkialla mutta erilainen jokaiselle satelliitille, ja ainakin kellokorjaus nopeasti muuttuva) ja ionosfäärin vaikutuksesta (sama kaikille satelliiteille mutta paikkariippuvainen, siksi se lasketaan *hilan* muodossa). Ionosfäärikorjaus on valiidi vain alueella, jossa on tukiasemia.

Systeemi ollaan laajentamassa Meksikoon ja Kanadaan.

WAAS on myös käytössä ilmailun ulkopuolella, esim. merenkulussa.

6.2.1 LAAS

LAAS (Local Area Augmentation System) on tarkoitettu mahdollistamaan lentokoneiden automaattista laskeutumista vilkailla lentokentillä: *ICAO Category III*. LAAS-järjestelmässä käytetään lentokenttäalueella toimivat, GPS-vastaanottimet, joiden havainnoista lasketaan korjaukset paikallisesti ja lähetetään lentokoneille radioteitse (VHF). Toisin kuin WAAS se siis vaatii erikoislaitteistoja lentokentällä. Kuitenkin yksi sellainen laitteisto korvautuu useita perinteisiä laitteistoja, kuten VOR-majakat, jokaiselle kiitoradalle.

LAAS voidaan käyttää myös ohjaamaan lentokentällä liikkuvat maakulkuneuvot.

Satelliitti	Pituusaste	Loppuu	Huom.
Inmarsat IOR-W	25.1E		
Artemis	21.5E	2015	ionimoottori
Inmarsat III AOR-E	15.5W		

Taulukko 6.3: EGNOS-satelliitit. Nämä ovat yleistietoliikennesatelliitit, joissa SBAS-transponderi on vain pieni osa hyötykuormasta.

LAAS on ns. Ground Based Augmentation System (GBAS). Sen käyttö ei ole vielä yleisesti hyväksytty, koska GPS-järjestelmä muodostuu riskitekijä, ns. *single point of failure*.

6.3 MSAS

MSAS (MTSAT Satellite-based Augmentation System) on Japanilainen SBAS. Se on yhteensopiva WAAS:n ja EGNOS:n kanssa.

6.4 EGNOS

EGNOS on Euroopan Komission, ESA:n ja Eurocontrolin (yhteiseurooppalainen ilmailuturvallisuuden organisaatio) yhteinen hanke. Sitä kutsutaan joskus GNSS-1, erottaakseen sitä Galileosta, joka on siis GNSS-2.

EGNOS on periaatteessa yhteensopiva, eli ”yhteentoimiva”, WAASin kanssa. On kuitenkin ollut ongelmia, jotka liittyivät tapaan, jolla ilmoitetaan koelähetykset.

EGNOS käynnistyi toimintansa heinäkuuta 2005.

EGNOS koostuu neljästä toiminnallisesta osasta: maasegmentti, tukisegmentti, avaruussegmentti ja käyttäjäsegmentti.

6.4.1 EGNOSin maasegmentti

EGNOSin maasegmentti koostuu seuraavista komponenteista:

1. RIMS (Ranging and Integrity Monitoring Stations): 34. Vastaanottavat signaalin ja lähettävät eteenpäin MCC keskuksiin.
2. MCC (Master Control Centres): 4. Vastaanottavat data RIMSeilta ja laskevat siitä korjauksia ja integriteettitietoja, joita lähetetään eteenpäin.
3. NLES (Navigation Land Earth Stations) lähettävät tiedot eteenpäin geostationaarisin satelliitteihin.

Kuten WAASin tapauksessa, ovat myös EGNOSin maa-asemien väliset tietoliikenneyhtydetyt vastavarten rakennettuja.

EGNOS Transafrica -hankkeen puitteissa perustettiin v.2002 jälkeen 10 EGNOS-RIMS asemaa Afrikan alueella, Hartebeesthoekin lisäksi.

6.5 QZSS

Japanissa on suunnitteilla järjestelmä nimeltä QZSS, Quasi-Zenith Satellite System. Se on suunniteltu GPS:n tukevana järjestelmä joka käyttää GPS:n signaalirakennetta.

Satelliittiradat ovat 24 tunnin radat, joiden inkliinaatiokulma on korkea, n. $45^\circ - 53^\circ$, ja hyvin pitkulaisia, eli radan eksentrisyys on suuri. Tarkoitus on, että millä hetkellä tahansa olisi aina yksi satelliitti roikkumassa Japanin taivaalla kohtuullisen korkealla elevaatiokulmalla. Tästä nimitys ”quasi-zenith” on peräisin. Se vaatisi kolme satelliittia radassa. Satelliitit kelpaavat myös, ja varsinkin, tietoliikennesatelliiteiksi, kuten aikanaan Neuvostoliittolaiset Molnya-satelliitit, joilla oli samanlainen toiminta-idea.

QZSS on tällä hetkellä suunnitteluvaiheessa, laukaisu on suunnitteilla v. 2008. Toisin kuin muut (geostationaariset) SBAS:t, tarjoaa tämä järjestelmä *käyttökelpoisia* mittaussuureita pseudoetäisyys ja kantoaallon vaihe.

6.6 SiSNET-kokeilu

SiSNet (Signal in Space over the Internet) mahdollistaa EGNOSin korjausten imuroimista (melkein) tosajassa Internetin kautta. Näin voidaan EGNOS-satelliittien korjaukset käyttää myös paikoissa (kuten korkeilla leveysasteilla) joissa geostationaariset satelliittit näkyvät huonosti.

Ks. <http://www.egnos-pro.esa.int/sisnet/index.html>. SiSNet on ESA:n sponsoroima teknologia, jota kehitettiin vuosina 2001-2006. Klienttisovellus on vapaasti saatavilla Pocket-PC kämmenmikroille.

7 Uutta teknologia: asennonmittaus

Kun käytetään paikannusteknologia kentällä, on usein mielekästä myös määrittää oman asennonsa. Sen avulla voidaan suhteuttaa laitteessa näkyvä kartta ympyröivään maailmaan.

Tavallaan kaikki laitteet, jotka osaavat näyttää käyttäjälle kartan, jo suorittavat asennonmittaus, mutta hyvin “epävirallisesti”: se toimii sillä tavalla, että laite olettaa, että käyttäjä liikkuu (kävelee, ajaa) suoraan eteenpäin, ja orientoi sitten kuvaruudussa oleva kartta sen oletuksen mukaisesti.

Tämä on intuitiivinen käyttäytymistapa, josta käyttäjät useimmiten eivät ole edes tietoisia. Kuitenkin, jos seisoo paikallaan ja kääntyy toiseen suuntaan, laite ei pysy perässä.

On olemassa myös oikeita asennonmittausvälineitä. Niiden käyttö kenttämittauslaitteissa on kuitenkin vielä alkutekijöissään.

7.1 Inertialaite

Tämä laite sisältää kolme kiihtyvyyssmittaria ja kolme (laser-)gyroskoopia. Niiden avulla se voi seurata oman (eli laitteiston, johon se on integroituna) rotaatioliikkeet sekä lineaariset liikkeet. Kun aika kuluu, huononee paikannusratkaisu, jota saadaan integroimalla mitatut kiihtyvyydet kaksi kertaa, ensin nopeuksiksi, ja vielä kerran paikoiksi.

Huononemista voidaan hallita, jos aina välillä suoritetaan “oikea” paikannus, esim. GNSS:n avulla. Näin voidaan rakentaa järjestelmä, joka säilyttää paikannustarkkuuttaan vaikka GNSS-signaali on katkonainen (tunnelit, sillat, sisätilat). Samalla saadaan myös koko laitteiston tarkka asento.

Esimerkki sellaisesta integroidusta laitteistosta on Novatel SPAN (Synchronized Position Attitude Navigation), http://www.imar-navigation.de/download/novatel_imar_gyrosymposium2005paper.pdf.

Mittaustarkkuudet näissä laitteissa ovat vaikuttavia: rotaatioliikkeen vakaus on (hyvälaatuisen mekaanisen gyroskoopin tapauksessa) luokkaa $0.0001^\circ/h$.

7.2 GNSS:n moniantennijärjestelmä

Myös GNSS-järjestelmällä voidaan mitata asentoja käyttämällä useita (vähintään kolme) eri antennia. Menetelmä on tosiaikainen kinemaattinen paikannus hyvin lyhyellä vektorilla.

Kuten kuvasta näkyy, havaitaan sama satelliitti yht'aikaa kahdesta eri antennista. Mittaussuure on erotus kahden kantoaaltovaihemittauksen välillä:

$$\Delta P^s = P_2^s - P_1^s = \langle \mathbf{v} \cdot \mathbf{e}^s \rangle + k\lambda,$$

jossa \mathbf{v} on antennien välinen vektori, \mathbf{e}^s on käytetyn satelliitin s suuntavektori (yksikkävektori, $\|\mathbf{e}\| = 1$) ja k on ambiguiteetteja (moniarvoisuuksia) kuvaava kokonaisluku..

Kirjoitetaan tämä uudelleen redukoimalla havaintosuure väliin $[0, \lambda)$:

$$\Delta P^s \bmod \lambda = \langle \mathbf{v} \cdot \mathbf{e}^s \rangle + k'\lambda.$$

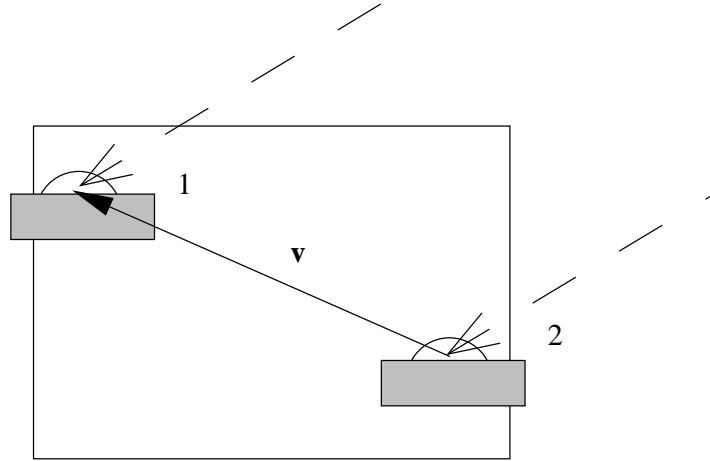
Tästä olisi ratkaistava yht'aikaa vektori \mathbf{v} ja kokonaislukutuntematon k' . Vektorin ratkaiseminen vaatii vähintään kolme eri satelliitin havaintoa, ja silloin arvot k' jäävät vielä auki:

$$\Delta P^1 \bmod \lambda = \langle \mathbf{v} \cdot \mathbf{e}^1 \rangle + k'^1 \lambda,$$

$$\Delta P^2 \bmod \lambda = \langle \mathbf{v} \cdot \mathbf{e}^2 \rangle + k'^2 \lambda,$$

$$\Delta P^3 \bmod \lambda = \langle \mathbf{v} \cdot \mathbf{e}^3 \rangle + k'^3 \lambda.$$

7 Uutta teknologia: asennonmittaus



Kuva 7.1: Asennonmittaus GNSS:llä

Arvoista k'^1, k'^2, k'^3 tiedämme ainakin, että ne eivät voi olla kovin isoja jos vektori \mathbf{v} on lyhyt: kun $\Delta P^s \bmod \lambda$ on välillä $[0, \lambda)$ ja $\langle \mathbf{v} \cdot \mathbf{e}^s \rangle$ välillä $[-\|\mathbf{v}\|, \|\mathbf{v}\|]$, voi k'^s olla vain välissä $\left[-\frac{\|\mathbf{v}\|}{\lambda}, \frac{\|\mathbf{v}\|}{\lambda} + 1\right]$. Jos vektori on esim. 2 m pitkä ja aallonpituus on 24 cm, ovat ainoat mahdolliset arvot k'^s :lle: -8, -7, ..., +8, +9.

Näin saadaan ratkaisu:

1. Kokeile kaikki mahdolliset k'^s -arvot kolmelle satelliitille 1,2 ja 3, ja laske jokaiselle yhdistelmälle vektoriratkaisu \mathbf{v} . Laskettavien ratkaisujen kokonaismäärä on esimerkkitapauksessa $18^3 = 5832$.
2. Jos vektori on esim. 20 m pitkä, on laskettavien ratkaisujen kokonaismäärä jo $180^3 = 5.8$ miljoona. Se vaatii jo laskentaresursseja. Toisaalta, jos on käytettävissä kahden taajuuden laite, voimme käyttää *widelaning*, jonka tehollinen aallonpituus on 86 cm. Silloin tarvitaan vain $48^3 = 110592$ eri ratkaisuja.
3. Jos näkyy enemmän kuin kolme satelliittia, valitaan niistä kolme, jotka yhdessä tuottavat mahdollisimman hyvän geometrian. Tämä on helppoa: käy vaan kaikki tripletit läpi ja laske niiden determinanttiarvo $\mathbf{e}^1 \cdot \langle \mathbf{e}^2 \times \mathbf{e}^3 \rangle$. Maksimiarvo voittaa. Jos on esim. 10 satelliittia näkyvissä, on laskettava $10 \cdot 9 \cdot 8 = 720$ determinanttia.
4. Tämän jälkeen testataan jokaiselle näin löydetylle alustavalle ratkaisulle $\widehat{\mathbf{v}}_{k'^1, k'^2, k'^3}$, onko $\|\widehat{\mathbf{v}}\|$ riittävän lähellä tunnettua antennin välistä etäisyyttä. Ratkaisut jotka eivät ole, voidaan heti heittää pois.
5. Tämän jälkeen taas lasketaan muiden satelliittien havaintosuureet:

$$\begin{aligned} \Delta P^4 \widehat{\bmod} \lambda &= \langle \widehat{\mathbf{v}} \cdot \mathbf{e}^4 \rangle + k'^4 \lambda, \\ \Delta P^5 \widehat{\bmod} \lambda &= \langle \widehat{\mathbf{v}} \cdot \mathbf{e}^5 \rangle + k'^5 \lambda, \\ &\dots \\ \Delta P^n \widehat{\bmod} \lambda &= \langle \widehat{\mathbf{v}} \cdot \mathbf{e}^n \rangle + k'^n \lambda. \end{aligned}$$

Kaikki vasemman puolen arvot pitää täsmentää mittausepävarmuuksiensa sisällä *mitattujen* kantoaaltovaiheiden kanssa yhdelle arvolle k'^4, k'^5, \dots . Yleensä näin käy *kaikille* arvoille k'^s , $s = 4, \dots, n$ vain yhden ratkaisun kohdalla.

6. Näin löydetyin arvojoukon k'^s , $s = 1, \dots, n$ avulla suoritetaan *lopullinen tasoitus* vektorin \mathbf{v} laskemiseksi *kaikista* havainnoista.
7. Kun laite (kulkuneuvo) liikkuu, ja ei tule vaihekatkoksia, arvot k'^s pysyvät ennallaan. Silloin voi jatkuvasti ratkaistaa \mathbf{v} tosiajassa kerätyistä havainnoista.

7.3 MEMS (Microelectronic Mechanical System)

Nämä laitteet ovat pieniä ja edullisia kiihtyvyyden- ja rotaatioantureita. Valmistusprosessi on samanlainen kuin tietokonemikropiirien: fotolitografia.

7.3.1 Kiihtyvyydsmittarit

Nämä piirit mittaavat kiihtyvyyttä mittaamalla, esim. kapasitiivisesti, pienen koemassan siirtymisen kiihtyvyyden (pseudovoiman) vaikutuksesta. Eräs malli osaa mitata kiihtyvyyksiä 1.7 g:n (17 ms^{-2}) saakka, vakaudella 0.2% eli 340 mGal. Tämän ymmärtämiseksi sanottakoon, että 340 mGal:n kiihtyvyys minuutin aikana kuljettaa matkaa 6 m. Itse laitteen *herkkyys* on vieläkin parempi, muutama mGal. Se myös kestää pudottamista vaikkapa betonilattiaan (kiihtyvyys 3500g!). Sitä on myös ammuttu tykillä.

Kuva, ks. <http://www.scharfphoto.com/stockphotos/archives/000504.php>.

Hinnat liikkuvat nykyisin (2007) muutaman dollarin, tai jopa alle dollarin, tasolla. Kooltaan ne ovat muutama mm. Sovellusalueet: mm. auton airbagin laukaisuanturit ja kannettavien mikroietokoneiden kovalevyjen putoamissuojan laukaisuanturit, joiden ansiosta niiden hinta on pudonnut.

7.3.2 Rotaatioanturit

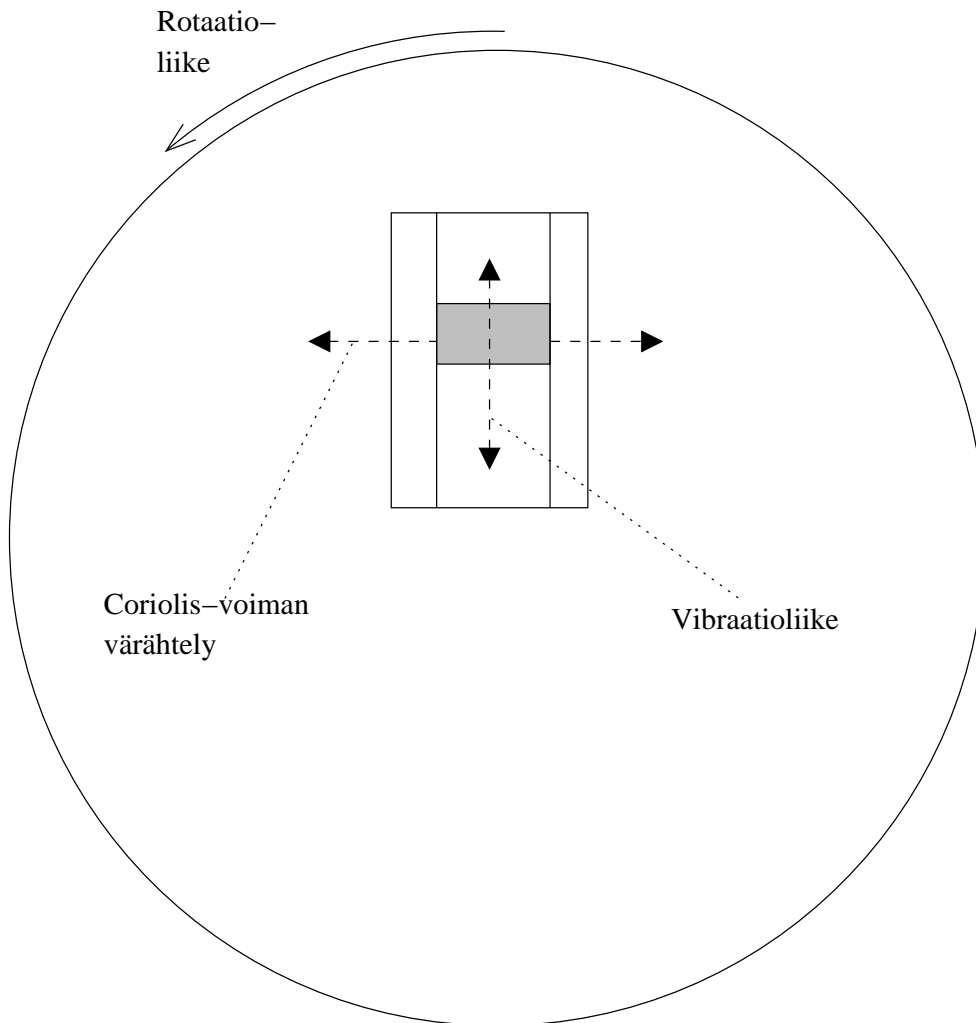
Rotaatioanturit perustuvat tavallisesti äänihaarukan vibraation taajuuden mittaamiseen. Ks. [11]. Kuten pyörivä kappale, myös värähtelevä kappale yrittää pysyä samassa tasossa. Tähän tarvittavaa vääntöä, ns. Coriolis-voimaa, mitataan, esim. kapasitiivisesti; mittauservo on verrannollinen rotaatioliikkeeseen. Ks. kuva. Kolmen akselin eli vapausasteen laite valmistetaan kolmesta yhden akselin komponentista.

Nämä laitteet pystyvät $0.1^\circ/\text{s}$ tarkkuutteen, mikä on kuusi suuruusluokkaa heikompaa kuin "oikea" inertiaalite, ks. yllä.

Sovellusalueita: videokameroiden kuvan vakauttaminen, robotiikka, pienoislentokoneet, ...

7.4 Integraatio

Käytännön laitteessa yllä kuvatut laitteistoratkaisut *integroidaan* toimivaksi järjestelmäksi. Siinä on lisättävä myös aina laskentakapasiteettia; laskentamenetelmä on tyypillisesti *Kalman-suodin*, joka ottaa vastaan kaikkien anturien mittaukset ja estimoi tosiajassa järjestelmän tilaa kuvaavat parametrit eli *tilavektori*. Siihen kuuluvat ainakin sijainti ja asento.



Kuva 7.2: Rotaatioanturin periaate. Jos alusta pyörii, aiheuttaa koemassan värähtely (kuvassa ylös-alas suunnassa) Coriolis-voiman (vasen-oikea suunnassa, myös periodinen), jota mitataan kapasitiivisesti.

8 GNSS, GIS and geophysics

- General: geolocation of measurements
- Airborne measurements; gravimetry, magnetometry... [see Methods of Navigation course]
- Airborne photogrammetry, remote sensing
- Shipborne measurements; sonar, side-scanning sonar, ...
- Measurements on land.
 - Example: ground penetrating radar
 - Example: archaeological excavation

<http://www.google.fi/search?hl=fi&client=firefox-a&rls=com.ubuntu%3Aen-US%3Aofficial&hs=0JW&q=GPS+GIS+geophysics&btnG=Hae&meta=>

Kirjallisuutta

- [1] Frankfurt am Main BKG. NTRIP. URL: http://igs.ifag.de/ntrip/ntrip_toc.htm. Luettu 3.10.2005. 3.3.3
- [2] Kai Borre. RTCM2ASC rel 1.0. URL: <http://kom.aau.dk/borre/masters/receiver/rtcm2asc.htm>. Luettu 3.10.2005. 2.4.1
- [3] Grace XingXin Gao, Alan Chen, Sherman Lo, David de Lorenzo, and Per Enge. GNSS over China – The Compass MEO Satellite Codes. *Inside GNSS*, 2(5):36–43, 2007. 5.4.2
- [4] Pasi Häkli and Hannu Koivula. Virtuaali-RTK (VRSTM) tutkimus. Tiedote 27, Finnish Geodetic Institute, Masala, 2004. 3.5.2
- [5] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, and J. Collins. *GPS Theory and Practice*. Springer-Verlag, fourth, revised edition, 1997. ISBN 3-211-82839-7. 3.1
- [6] Jaana Järvinen. Luentomoniste 2003:n GIS-GPS-kurssi. 2003. 1.1, 1.2
- [7] Herbert Landau, Ulrich Vollath, and Xiaoming Chen. Virtual Reference Station Systems. *Journal of Global Positioning Systems*, 1(2):137–143, 2002. 3.1
- [8] Patrap Misra and Per Enge. *Global Positioning System – Signals, Measurements, and Performance*. Ganga-Jamuna Press, 2001. ISBN 0-9709544-0-9. 3.3.4
- [9] Markku Poutanen. *GPS-paikanmääritys*. Ursa, Helsinki, 1998. Ursan julkaisuja 64. 1.5.1, 3.1, 3.3.6
- [10] Lambert Wanninger. Introduction to Network RTK. URL: <http://www.network-rtk.info/intro/introduction.html>, 2004. Luettu 27.09.2005. 3.1
- [11] Wikipedia. Vibrating structure gyroscope — wikipedia, the free encyclopedia, 2007. [Online; accessed 10-September-2007]. 7.3.2